



Christian Hoflehner, BSc

**Optimierung der Scherfestigkeit beim Wider-
standsschweißen
von Hartmetallzähnen an Stahltragkörpern**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger

Erwin Hörmanseder, MAS

Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

Leitz GmbH, Riedau

Graz, Februar 2015

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 Masterarbeit 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 master's thesis.

Datum/Date

Unterschrift/Signature

Danksagung

Als erstes gilt mein Dank meiner Familie, die mich auf dem gesamten Lebensweg immer unterstützt und einen großen Anteil daran hat, dass ich da stehe wo ich heute bin.

Ebenso gilt mein Dank der Leitz GmbH und Co. KG die mir die Durchführung dieser Masterarbeit ermöglicht hat. Danke auch für das große Vertrauen und die großartige Unterstützung die mir während dieser Arbeit entgegengebracht worden ist.

Ein besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Norbert Enzinger vom Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik und Erwin Hörmanseder von der Leitz GmbH und Co. KG. Auch hier fand ich immer auf offene Ohren, was sich sehr auf den positiven Abschluss dieser Arbeit ausgewirkt hat.

Vielen Dank auch dem gesamten IWS-Team, das mich sehr gut aufgenommen hat und wo ich mich sehr wohl fühle. Ich habe dort viele Chancen und Einblicke bekommen, die ich nicht missen möchte.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Korrektur-Lesern Ulrike Gruber, Martina Hoflehner und Renate Zwirlein bedanken, die die ein oder andere amüsante Stunde beim Durchlesen dieser Arbeit verbracht haben dürfen.

Christian Hoflehner

Abstract/Kurzfassung

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit werden durch die Anwendung der Methode „Design of Experiments“ (DoE) die optimalen Schweißparameter für das Widerstandsschweißen von Hartmetallzähnen auf Stahlträgern ermittelt. Die Zielgröße ist die Abscherfestigkeit dieser Fügeverbindung, welche maximiert werden soll. Die DoE Methode beinhaltet die Festlegung und Auswahl möglicher Einflussfaktoren auf die Zielgröße, sowie die Planung der Versuche. Im Vorversuch werden die Grenzen des Schweißbereiches ermittelt. Diese Grenzen dienen als Parameterfenster im anschließenden Screeningversuch. Hier werden mittels eines fraktionellen faktoriellen Versuchsplans die Größen identifiziert, die den Widerstandsschweißprozess signifikant beeinflussen. Im Hauptversuch wird, mithilfe der Schlüsselfaktoren, ein Optimum für die Abscherfestigkeit ermittelt. Der Bestätigungsversuch wird genutzt, um die Reproduzierbarkeit dieses Optimums zu untersuchen.

Die Fügeverbindung gilt als erfolgreich, wenn sie ein ähnliches Festigkeitsniveau wie eine konventionell gelötete Verbindung erreicht.

Abstract

In this master thesis a parameter optimisation for the resistance welding of tungsten carbide teeth and steel bodies is performed by the application of “Design of Experiments” (DoE). The target parameter is the maximum shear strength.. This DoE method contains the determination and selection of factors influencing the target parameter. In pretests, the weldability range is determined. These boundaries are the factor levels for the screening tests. A fractional factorial design is used to identify the main factors, which influence the resistance welding process. These key factors are used to find an optimum of the shear strength. In the last step, the reproducibility of the best parameter set is tested.

The shear strength of this welded join should be on the same level as a conventional brazened join.



Inhalt

Danksagung	i
Abstract/Kurzfassung	ii
Inhalt.....	iv
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel.....	2
2 Literatur	3
2.1 Sägen	3
2.1.1 Sägeblätter.....	3
2.1.2 Zahnteilung	4
2.1.3 Zahnform.....	4
2.1.4 Freischneiden des Sägeblattes.....	5
2.1.5 Sägen mit Kreissägeblättern	6
2.2 Hartmetall	6
2.2.1 Wesentliche Werkstoffeigenschaften	7
2.2.2 Einteilung der Hartmetallsorten.....	10
2.3 Löten von Hartmetall	12
2.4 Widerstandsschweißen	14
2.4.1 Ablauf des Widerstandsschweißprozesses	15
2.4.2 Wärmeentwicklung beim Widerstandsschweißen	16
2.4.3 Elektroden und Elektrodenkraft.....	17
2.5 Design of Experiments (DoE)	18
2.5.1 Vorgehensweise DoE	18
2.5.2 Versuchspläne	19



2.5.3	Analyse	23
3	Versuchsaufbau	25
3.1	Versuchsmaterial.....	25
3.1.1	Kreissägeblätter	25
3.1.2	Hartmetall.....	28
3.1.3	Schweißelektroden	29
3.2	Materialkombinationen	29
3.3	Versuchsablauf.....	31
3.3.1	Der Schweißversuch	34
3.3.2	Die Wärmebehandlung	36
3.3.3	Das Planschleifen	37
3.3.4	Die Abscherprüfung	38
3.3.5	Das Auswerten.....	40
3.3.6	Beschriftungssystem	40
4	Versuchsdurchführung	42
4.1	Parameterauswahl.....	42
4.2	Vorversuch	45
4.2.1	Der Schweißbereich.....	45
4.2.2	Ergebnis.....	46
4.3	Screening-Versuch.....	47
4.3.1	Einsinkweg.....	49
4.3.2	Ergebnis Schweißparameter	50
4.3.3	Ergebnis Plattensitz	53
4.3.4	Ergebnis Hartmetall	54
4.3.5	Ergebnis Elektrodenwerkstoff	54



4.3.6	Ergebnis Oberflächenbeschaffenheit Stammblatt	56
4.3.7	Schlussfolgerung	57
4.4	Vollversuch	58
4.4.1	Ergebnis	61
4.4.2	Schlussfolgerung	63
4.5	Schweißen mit langer Temperaturführung	63
4.5.1	Ergebnis	65
4.6	Bestätigungsversuch	66
4.6.1	Ergebnis Bestätigungsversuch	67
4.6.2	Ergebnis Vergleich Abschervorrichtung	70
4.7	Charakterisierung der Verbindung	72
4.7.1	Metallographische Untersuchung	72
4.7.2	Ergebnisse Härtemessung	75
4.8	Weitere Erkenntnisse aus den Versuchen	76
4.8.1	Einfluss der Wärmebehandlung	76
4.8.2	Stromübergang Vorrichtung	78
4.8.3	Spritzer durch Feuchtigkeit	79
4.9	Diskussion der Ergebnisse	80
4.9.1	Erreichen des Zielwertes für Abscherfestigkeit	80
4.9.2	Streuung der Ergebnisse	81
4.10	Empfehlung für andere Fügegeometrien	83
5	Zusammenfassung und Ausblick	85
6	Anhang	87
7	Verzeichnisse	96
7.1	Formelverzeichnis	96



7.2	Abbildungsverzeichnis	96
7.3	Tabellenverzeichnis	100
8	Literaturverzeichnis	100

1 Einleitung

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist es, das Potential von Widerstandsschweißen von Hartmetall aufzuzeigen und eine qualitativ hochwertige Alternative zum Löten einer Hartmetall-Stahl Verbindung zu finden.

1.1 Motivation

Gegenüber dem Löten können durch Widerstandsschweißen erhebliche Einsparungen in Bereichen von:

- Energie,
- Rohstoffen (Wegfall des Lots) und
- Zeit (kurze Schweißzeiten)

erzielt werden. Weitere Vorteile bei diesem Fügeverfahren sind:

- eine bessere Automatisierbarkeit
- weniger bzw. konzentriertere Wärmeeinbringung → weniger Verzug
- ein umweltverträglicheres Arbeiten (kein Flussmittel, Energieeinsparung)

Beim Löten mit Flussmittel, das oft angewandt wird, müssen unter anderem die entsprechenden Auflagen zur Gewässerreinigung erfüllt werden. Die Alternative Vakuumlöten, die den Einsatz von Flussmittel zu vermeiden hilft, ist nicht wesentlich kostengünstiger, da entsprechende Vakuumöfen erforderlich sind. Im Vergleich dazu liegen beim Widerstandsschweißen von Hartmetallen die Investitionskosten niedriger. Das Widerstandsschweißen bietet als automatisierbares Fügeverfahren mit kurzen Taktzeiten und damit verbundener höherer Fertigungsleistung im Vergleich zu den anderen bisher angewandten Verfahren deutliche wirtschaftliche Vorteile. [1]

Auch hinsichtlich der Nachbearbeitung sind beim Widerstandsschweißen keine Nachteile zu erwarten. [1]

Die maximale Einsatztemperatur von Lötverbindungen ist durch die Erweichung des Lotes bei erhöhter Temperatur begrenzt. Dagegen ist von Schweißverbindungen eine höhere Warmfestigkeit und somit eine Erhöhung der Standzeiten und der maxi-

malen Arbeitstemperatur von Schneidwerkzeugen beim sogenannten „Warmspanen“ (z.B. Warmsägen) zu erwarten. [1]

1.2 Ziel

Die Abscherfestigkeit der geschweißten Verbindung soll mindestens genauso groß sein, wie bei konventionell gelöteten Verbindungen. Bei Lötverbindungen wird eine Abscherfestigkeit von 200 MPa erzielt.

2 Literatur

2.1 Sägen

Sägen ist ein spanendes Verfahren mit kreisförmiger oder geradliniger Schnittbewegung. Sägen wird zum Trennen von Werkstücken, zum Ablängen von Stangen- und Profilmaterial, zum Ausschneiden von Durchbrüchen in Platten sowie zum Einschneiden von Nuten und Schlitzten angewandt. Dabei führt das vielschneidige Werkzeug die Schnittbewegung und die Vorschubbewegung aus. [2]



Abbildung 1: Kreissägeblatt [3]

2.1.1 Sägeblätter

Sägeblätter für Hand- und Maschinensägen besitzen eine Vielzahl hintereinander liegender Zähne mit geringer Schnittbreite. Sie weisen eine Keilform auf und sind gehärtet. Der Werkstoff wird durch die Schneiden gleichzeitig in mehrere Ebenen zerspannt. Die Spanräume (Zahnlücken) nehmen die Späne auf und führen sie aus der Schnittfuge heraus. Durch die steigenden Werkstoffkosten wird zunehmend angestrebt, die Schnittkanäle schmal und somit den Schnittverlust möglichst gering zu halten, sowie ein Verlaufen des Schnittes weitestgehend zu verhindern. [2]

2.1.2 Zahnteilung

Die Zahnteilung bezeichnet den Abstand von Zahnspitze zu Zahnspitze und bestimmt die Größe der Zahnlücken für die Aufnahme der Späne. Je nach Härte und Dicke des zu bearbeitenden Werkstoffes wählt man Sägeblätter mit verschiedener Zahnteilung. Beim Sägen weicher Metalle und bei langen Schnittfugen muss die Zahnteilung möglichst grob sein, da sonst die Spanräume verstopfen. Beim Sägen harter Metalle und bei kurzen Schnittfugen sowie zum Schneiden von Blechen, dünnwandigen Profilen und Rohren fallen wesentlich geringere Spanmengen an, so dass keine Verstopfungsgefahr besteht. Deshalb kann hier eine feinere Zahnteilung gewählt werden. Dadurch kommen auch mehr Schneiden zum Eingriff, wird der einzelne Zahn mehr geschont und so bleibt das Sägeblatt länger scharf. Vorwiegend wird die Zahnteilung nach DIN 1837 fein und nach DIN 1838 grob gewählt. Im Allgemeinen gilt, dass immer mindestens vier Zähne im Materialquerschnitt im Eingriff sein sollten. Maßgebend hierfür ist immer der dünnste Materialquerschnitt. [2]

2.1.3 Zahnform

Unter der Zahnform versteht man die Kontur der Zahnschneide und des Zahngrundes. Welche Zahnform eingesetzt wird, hängt von dem zu sägenden Werkstoff und seiner Dimension ab. Handsägeblätter haben in der Regel Winkelzähne (A), Maschiensägeblätter meist Bogenzähne (B). Die Bogenzähne sind durch ihre Form widerstandfähiger als Winkelzähne. Die Geometrie und Winkel am Zahn sind ebenfalls von der Zahnform, sowie natürlich von dem zu sägenden Werkstoff abhängig. Im Regelfall beträgt der Keilwinkel β ungefähr 50° und die Summe aus Freiwinkel α , Keilwinkel β und Spanwinkel γ betragen zusammen fast 90° . Da die Hauptschnittkraft beim Sägen mit zunehmendem Spanwinkel γ immer kleiner wird, verwendet man überwiegend positive Spanwinkel. [2]

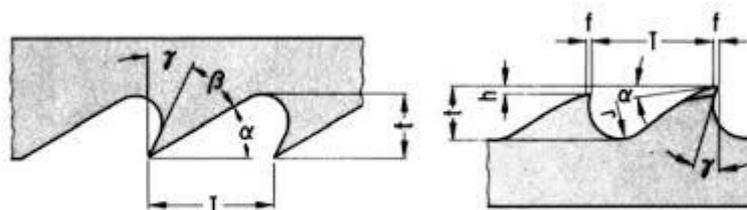


Abbildung 2: Winkel und Teilung am Sägezahn; Bandsäge (links); Kreissäge (rechts); α Freiwinkel; β Keilwinkel; γ Spanwinkel; T Teilung; t Zahntiefe [4]

2.1.3.1 Bestückte Sägeblätter

Heutzutage werden die Schneiden der Sägeblätter mit Zähnen aus Stellite, Hartmetall oder Diamant ausgeführt. Die Zähne können, je nach Anwendung, unterschiedlichste Geometrien annehmen (Abbildung 4).

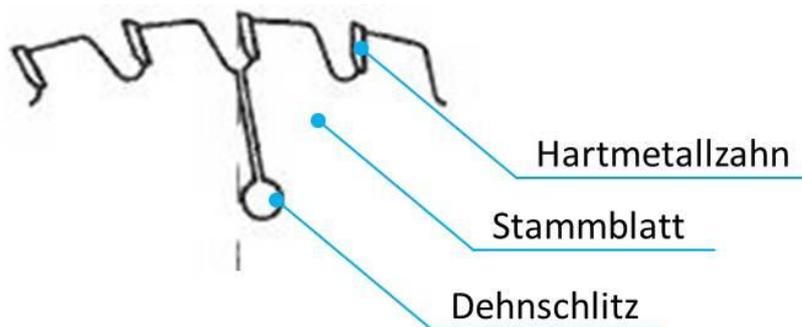


Abbildung 3: Ausschnitt eines bestückten Sägeblattes [3]

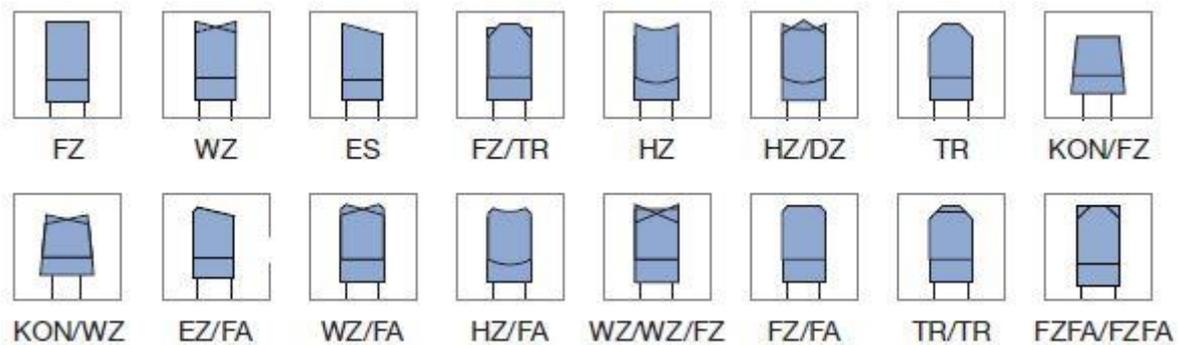


Abbildung 4: Zahnformen für bestückte Sägeblätter [3]

2.1.4 Freischneiden des Sägeblattes

Beim tieferen Eindringen eines glatten Sägeblattes in den Werkstoff vergrößert sich die Reibung an den Seiten. Das Blatt würde bald heißlaufen und klemmen. Damit dies nicht passiert, sind bei bandförmigen Sägeblättern entweder die Zähne geschränkt (d. h. abwechselnd nach rechts und links ausgebogen) oder gewellt. Bei gewellten Sägeblättern sind jeweils ungefähr sechs bis acht Zähne in Wellenform nach links und rechts ausgebogen. Gewellte Sägeblätter sind besonders bei feiner Zahnteilung zweckmäßig. Kreisförmige Maschinensägeblätter aus Schnellarbeits-

stahl hingegen sind entweder hohlgeschliffen, gestaucht oder haben Zähne aus Hartmetall. [2]

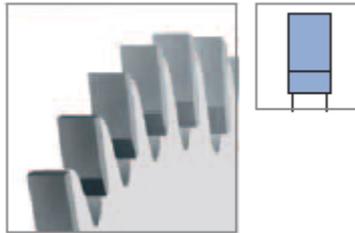


Abbildung 5: Hartmetallzahn auf Kreissägeblatt [3]

2.1.5 Sägen mit Kreissägeblättern

Bei Kreissägeblättern, welche in entsprechenden Kreissägemaschinen zum Einsatz kommen, unterscheidet man Stahlvollblätter, bei denen das ganze Blatt aus dem gleichen Werkstoff besteht und Kreissägeblätter mit eingesetzten Zahnsegmenten aus Schnellstahl oder Segmente mit eingesetzten Hartmetallzähnen. Kreissägeblätter haben im Vergleich zu den Bandsägeblättern eine ziemlich große Eigenstabilität. [2]

2.2 Hartmetall

Hartmetalle sind Werkstoffe, die aus einem hohen Anteil von harten Metallkarbiden bestehen. Diese sind in eine zähe metallische Matrix eingebettet. Die Kombination der hohen Härte der Karbide mit der Zähigkeit der Bindemetalle führen zu herausragenden Eigenschaften, die zu der weiten Verbreitung der Hartmetalle geführt haben. Hartmetalle weisen im Vergleich zu reinen Hartstoffen eine wesentlich bessere Zähigkeit auf. Sie sind aber im Vergleich zu zähen Stählen vergleichsweise spröde und teuer. Deshalb können Werkzeuge bzw. andere Teile nur in Ausnahmefällen komplett aus Hartmetall gefertigt werden. Es ergibt sich daher das Problem, Hartmetallteile auf geeigneten Trägerwerkstoffen, z.B. Stahl, zu befestigen. In bestimmten Fällen ist eine Klemmbefestigung (z.B. bei den Wendeschneidplatten) möglich. Für viele andere Anwendungen jedoch muss eine feste direkte Verbindung vorgesehen werden. Dabei finden bislang überwiegend Klebe- und Löttechniken Anwendung. [1]

Hartmetallwerkzeuge finden Anwendung bei der Zerspaltung von Holz, Stahl, Stein und Kunststoffen, als verschleißfeste Umformwerkzeuge bis hin zu kratzempfindlichen Gebrauchs- und Schmuckgegenständen. [1]



Abbildung 6: Hartmetall (1500x) 15% Co, Rest WC [5]

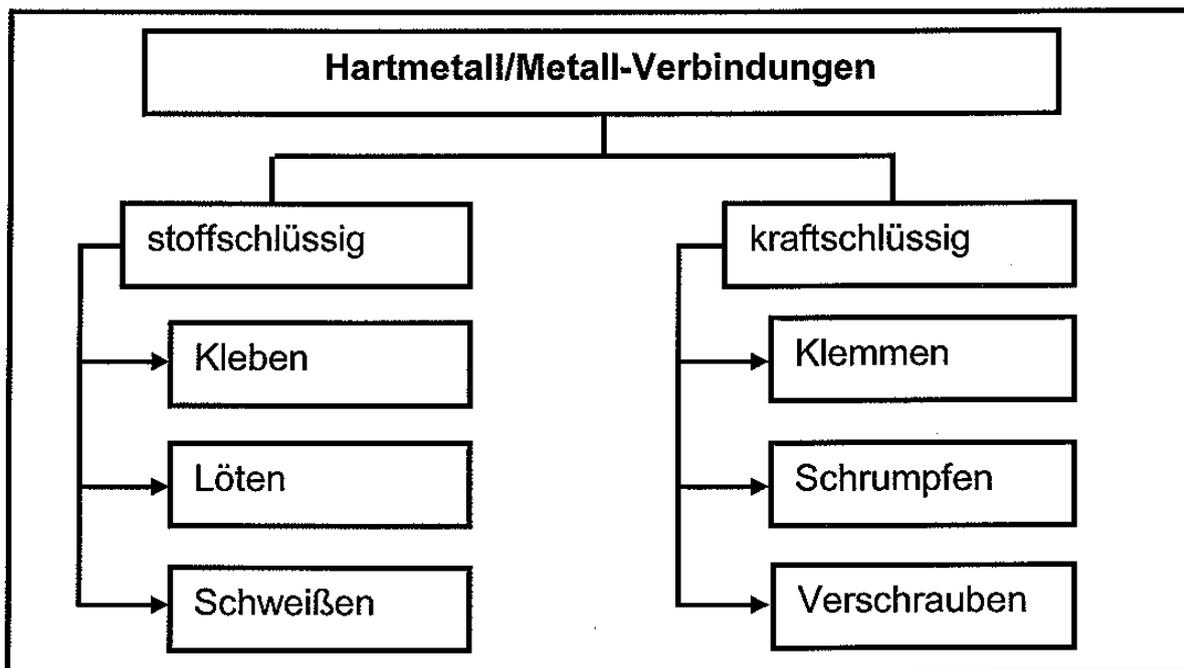


Abbildung 7: Fügen von Hartmetall mit Metall [5]

2.2.1 Wesentliche Werkstoffeigenschaften

In Abbildung 8 werden die mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften von Hartmetall und anderen Werkstoffen gegenübergestellt.

Die hohe Härte, Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul sind der Hauptgrund, warum sich Hartmetall als Schneidwerkstoff gegenüber Stahl durchgesetzt hat. Diese Eigenschaften werden aber mit einer geringen Zähigkeit erkauft. Darum, und auch wegen wirtschaftlichen Gründen, ist es ungünstig eine komplette Säge aus Hartmetall zu fertigen.

Für den Schweißprozess von Hartmetall auf Stahl sind die Eigenschaften Längsdehnungszahl, Wärmeleitfähigkeit und elektrischer Widerstand von großer Bedeutung. Für eine gleichmäßige Wärmeentwicklung beim Fügen sollten die Wärmeleitfähigkeit und der elektrische Widerstand möglichst gleich sein. Um möglichst geringe Wärmespannungen beim Abkühlen zu erzeugen, sollte die Längsdehnungszahl möglichst gleich sein. Beides ist hier nicht der Fall. Dadurch besteht die besondere Herausforderung, eine ordentliche Fügeverbindung zwischen diesen beiden, sehr unterschiedlichen, Werkstoffen zu erstellen.

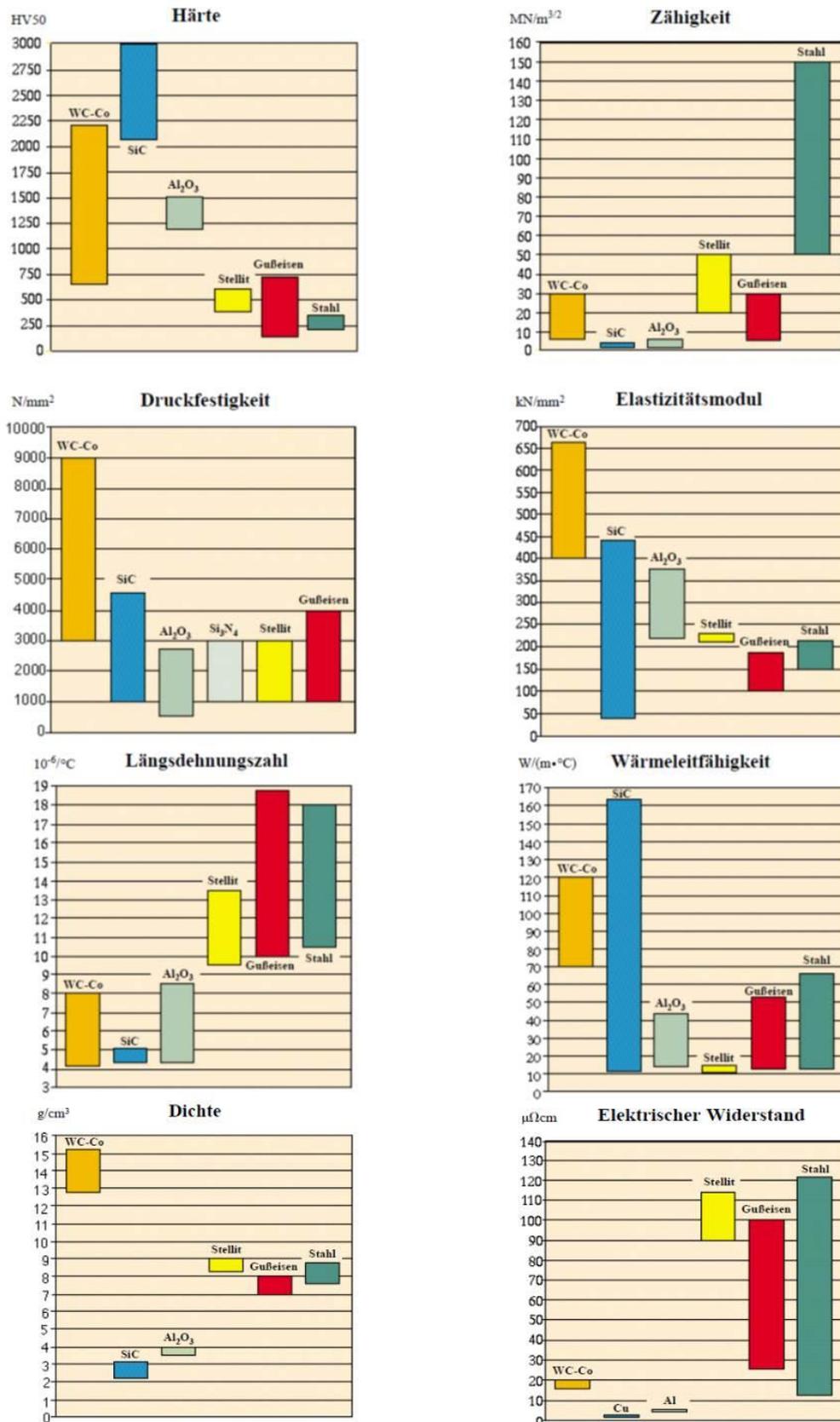


Abbildung 8: Eigenschaften von Hartmetall im Vergleich zu anderen Werkstoffen [6]

2.2.2 Einteilung der Hartmetallsorten

Nach ISO wird Hartmetall in die sogenannten Hauptzerspanungsgruppen P, M, K eingeteilt. Innerhalb einer Zerspanungsgruppe sind zweistellige Kennziffern für die jeweiligen Zerspanungsanwendungsgruppen vorgesehen, deren Höhe einen Maßstab für die Zähigkeitsbeanspruchungen und damit für die Zähigkeit des dafür zu verwendenden Hartmetalls darstellen. Mit zunehmender Kennzahl der Anwendungsgruppe nehmen die durch Werkstoffe und Arbeitsbedingungen bestimmten Zähigkeitsbeanspruchungen zu, die Vorschübe werden größer, die Schnittgeschwindigkeiten kleiner. Mit abnehmender Kennzahl hingegen steigt die Verschleißfestigkeit auf Kosten der Zähigkeit, und die Schnittgeschwindigkeiten werden größer. Dementsprechend sind Hartmetalle mit steigender Kennzahl zäher, mit abnehmender Kennzahl härter und verschleißfester. [5]

Tabelle 1: Kennzeichnung, mittlere Zusammensetzung und Eigenschaften der Hartmetall-Sorgen (1958) [5]

Bezeichnung ISO/TC 29/GT 9			Kennfarbe	Zusammensetzung *)			Dichte g/cm ³ etwa	Vickers- Härte HV 30 kg/mm ² etwa	Biege- festig- keit kg/mm ² etwa	Druck- festig- keit kg/mm ² etwa	Elastizi- täts- modul kg/mm ²	Wärme- dehnzahl 10 ⁻⁶ /°C	Wärme- leitfähig- keit cal/cm °C sec
Zerspanungs- Hauptgruppen für die Werkstoffe	Anwen- dungs- gruppen	Kenn- zeich- nende Merkmale		WC %	TiC + TaC % etwa	Co %							
P Stahl, Stahlguß, langspanender Temper- guß	P 01.2	↑ ¹⁾ ↓ 1 2	blau (RAL 5012 Munsell 2,5 PB 5/10)	30	64	6	7,2	1800	75	350	-	-	-
	P 01.3			51	43	6	8,5	1750	90	420	46 000	7,5	0,04
	P 01.4			62	33	5	10,1	1750	100	-	-	-	-
	P 05			77	18	5	12,2	1700	110	430	-	6	-
	P 10			63	28	9	10,7	1600	130	460	53 000	6,5	0,07
	P 20			76	14	10	11,9	1500	150	480	54 000	6	0,08
	P 25			71	20	9	12,4	1450	175	480	-	6	-
	P 30			82	8	10	13,1	1450	175	500	56 000	5,5	0,14
	P 40			75	12	13	12,7	1400	195	490	56 000	5,5	0,14
	P 50			68	15	17	12,5	1300	220	400	52 000	-	-
M Stahl, Stahlguß, Man- ganhartstahl, leg. Guß- eisen, austen. Stahl, Temperguß, sphärol. Gußeisen, Automaten- stahl	M 10	↑ ²⁾ ↓ 1 2	gelb (RAL 1007 Munsell 7,5 YR 7/10)	84	10	6	13,1	1700	135	500	58 000	5,5	0,12
	M 20			82	10	8	13,4	1550	160	500	57 000	5,5	0,15
	M 30			81	10	9	14,4	1450	180	480	-	-	-
	M 40			79	6	15	13,6	1300	210	440	54 000	-	-
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K Gußeisen, Hartguß, kurzspan. Temperguß, gehärteter Stahl, Nichteisenmetalle, Kunststoffe, Holz	K 01	↑ ³⁾ ↓ 1 2	rot (RAL 3001 Munsell 5 R 3/10)	92	4 ³⁾	4	15,0	1800	120	-	-	-	-
	K 05			91	3 ³⁾	6	14,5	1750	135	590	63 000	5	-
	K 10			92	2 ⁵⁾	6	14,8	1650	150	570	63 000	5	0,19
	K 20			92	2	6	14,8	1550	170	500	62 000	5	0,19
	K 30			89	2	9	14,4	1400	190	470	58 000	-	0,17
	K 40			88	-	12	14,3	1300	210	450	57 000	5,5	0,16
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹⁾-³⁾ In Richtung Pfeil 1: Zunehmende Härte, Verschleißfestigkeit und Schnittgeschwindigkeit.
In Richtung Pfeil 2: Fallende Härte und Verschleißfestigkeit, zunehmende Zähigkeit und Vorschübe.
*) Mittelwerte deutscher Hartmetallsorten, z. B. Böhlerit, Titanit, Widia. - ³⁾ Einschließlich VC.

Bei annähernd gleicher Wärmedehnzahl besitzen Hartmetalle der Anwendungsgruppe K im Vergleich mit P-Qualitäten eine bessere elektrische und thermische Leitfähigkeit. Für CO-Bindemetallgehalte unter 10% zeigen sich die Unterschiede in den Eigenschaften besonders deutlich. [1]

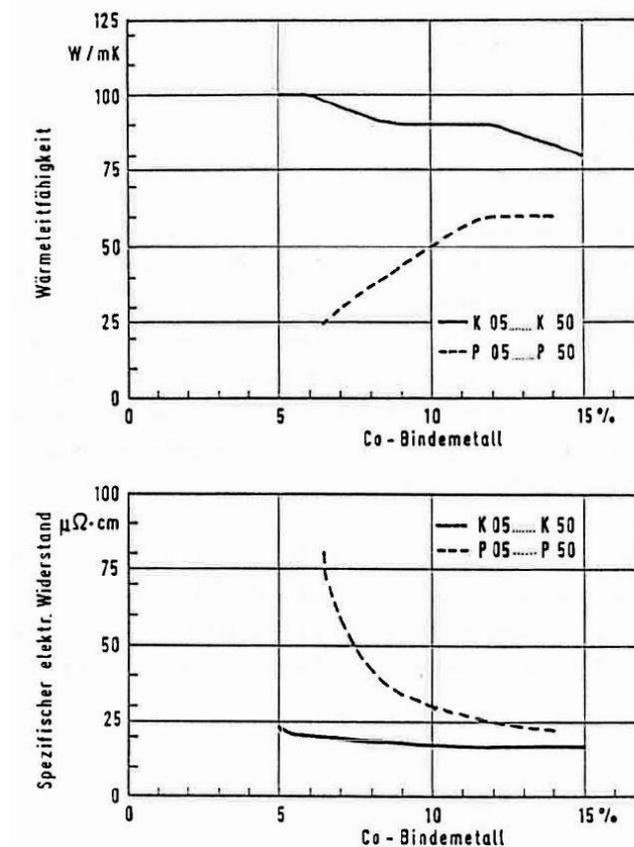


Abbildung 9: Vergleich von Wärmeleitfähigkeit λ (oben) und speziellem elektrischen Widerstand ρ (unten) der Anwendungsgruppen K und P bei Raumtemperatur nach Herstellerangaben, Fa. Plansee TIZIT GmbH.

[1]

Diese Zusammenhänge lassen den Schluss zu, dass Hartmetalle der Anwendungsgruppe K für das Widerstandsschweißen besser geeignet sind. Sie neigen bei Stromdurchfluss weniger zum Überhitzen und leiten zudem die entstandene Wärme besser ab. Hartmetallsorten mit Bindemetallgehalt von mehr als 10% Gewichtsanteil zeichnen sich grundsätzlich durch ein verbessertes Zähigkeitsverhalten aus. Sie können so die mechanische Belastung beim Widerstandspressschweißvorgang und im Betrieb besser aufnehmen. [1]

Hartmetallsorten der Anwendungsgruppe K sind für die Holzverarbeitung bestens geeignet. Dies ist ein sehr erfreulicher Umstand, da es Ziel ist, die in dieser Arbeit entwickelten Sägen in der holzverarbeitenden Industrie einzusetzen.

2.3 Lötten von Hartmetall

In der industriellen Produktion von hartmetallbestückten Werkzeugen wie Kreissägeblättern oder Fräsern stellt das Hartlöten die dominierende Fügetechnik zum Verbinden der Hartmetalle mit dem Stahlgrundkörper dar. Der Vorteil des Hartlötens, im Vergleich zum Schweißen, liegt in der niedrigeren Fügetemperatur, sodass die Mikrostruktur der verwendeten Grundmaterialien wesentlich weniger beeinflusst wird [7]. So ist es zum Beispiel möglich, mit einem geeigneten Hartlot unterhalb der Ferrit-Austenit-Umwandlungstemperatur von Stahl zu arbeiten, die bei 732° C liegt. [8]



Abbildung 10: Ausschnitt eines hartmetallbesetztem Sägeblattes; Quelle: Umicore [9]

Unbedingt zu beachten sind die unterschiedlich hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügepartner Hartmetall und Stahl. Diese liegen in der Regel bei 5 bis 7 x 10⁻⁶ K⁻¹ für Hartmetall und bei 11 bis 14 x10⁻⁶ K⁻¹ für Stähle. Demnach ist die Wärmeausdehnung des Stahls zwei bis drei Mal höher als die des Hartmetalls. [10], [7]

Hartmetalle sind grundlegend empfindlich gegenüber Zugspannungen. Je nach Hartmetallsorte und Bauteilgeometrie wirkt sich diese Eigenschaft unterschiedlich stark aus und hat Effekte auf den Stoffverbund beim Löten und in der Abkühlphase. Wird die Kombination Hartmetall und Stahl erhitzt, dehnt sich Stahl aufgrund eines wesentlich höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten stärker aus als Hartmetall. Bei der Löttemperatur sind die Fügepartner noch lose über die flüssige Lotschmelze verbunden; sie sind spannungsfrei. Erstarrt das Lot, ist das Hartmetall stoffschlüssig mit dem Stahl verbunden. Somit kann es zur direkten Kraftübertragung zwischen den beiden Werkstoffen kommen. Kühlt das Bauteil ab, so wird sich das Hartmetall wesentlich weniger als der Stahl kontrahieren. Das Resultat ist, dass durch eine Art „Bimetalleffekt“ Zugspannung durch den Stahl auf das Hartmetall übertragen wird. Dadurch kann es letztendlich zu einer irreversiblen Schädigung des Hartmetalls kommen, die sich durch Risse unmittelbar nach dem Löten, Schleifen oder im Einsatz zeigt. [7]

Aktuell werden zum Löten hartmetallbewährter Werkzeuge im Allgemeinen Hartlote auf der Basis Ag-Cu-Zn-(Mn)-Ni mit einem Silbergehalt von etwa 50 Prozent verwendet. Die Verarbeitungstemperatur dieser Lote liegt bei circa 710 bis 720° C. Beschrieben werden derartige Lotsysteme durch die Normen ISO 17672 [11]. In der Praxis hat sich gezeigt, dass Hartmetalle mit kleinen Fügeflächen in bestimmten Fällen nur mit einem niedrig schmelzenden Silberhartlot gelötet werden können. Mit zunehmender Fügefläche kommt es zu steigenden Spannungsniveaus im Hartmetall, die sich durch den Einsatz sogenannter Schichtlote deutlich reduzieren lassen. Bei diesen Loten wird eine Kupfer-Zwischenschicht, die die thermisch induzierten Spannungen abfangen kann, beidseitig mit einem Silber-Hartlot mit 49 Prozent Silberanteil plattiert. [8]



Abbildung 11: Schematischer Querschnitt durch ein Schichtlot; [9]

2.4 Widerstandsschweißen

Das Widerstandsschweißen gehört zur Gruppe der Pressschweißverfahren. Durch elektrische Erwärmung unter Druck werden die Teile zusammengefügt. Die dafür erforderliche Elektrodenkraft wird mittels mechanisch, elektrisch, pneumatisch oder hydraulisch arbeitender Kraftsysteme aufgebracht. Bei sehr kurzen Schweißzeiten und schnellem Erweichen der Fügeteile sind gute Nachsetzeigenschaften der Schweißwerkzeuge erforderlich. [1]

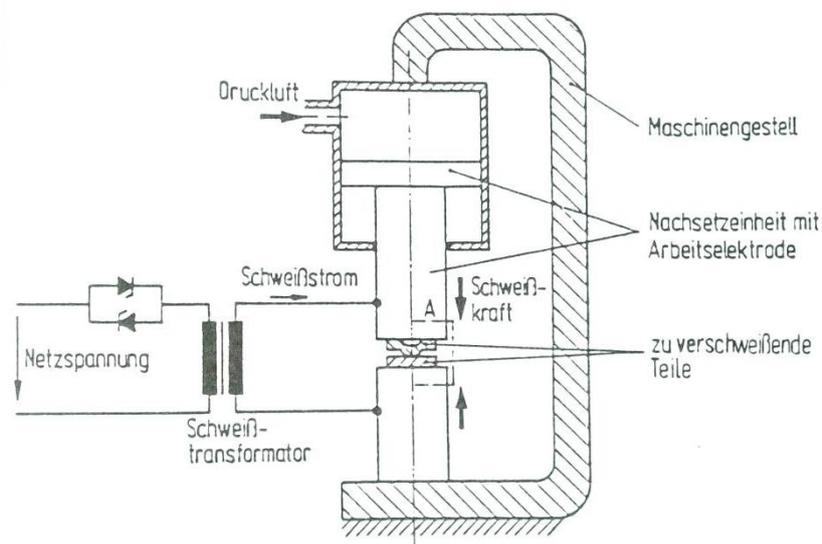


Abbildung 12: Aufbau einer Widerstandsschweißanlage (Prinzipskizze) [1]

Die beim Widerstandsschweißprozess ablaufenden Vorgänge sind komplex. Dabei kommt dem Zusammenwirken von Fügeteil, Stromquelle und der mechanischen Maschineneigenschaften eine besondere Bedeutung zu. [1]

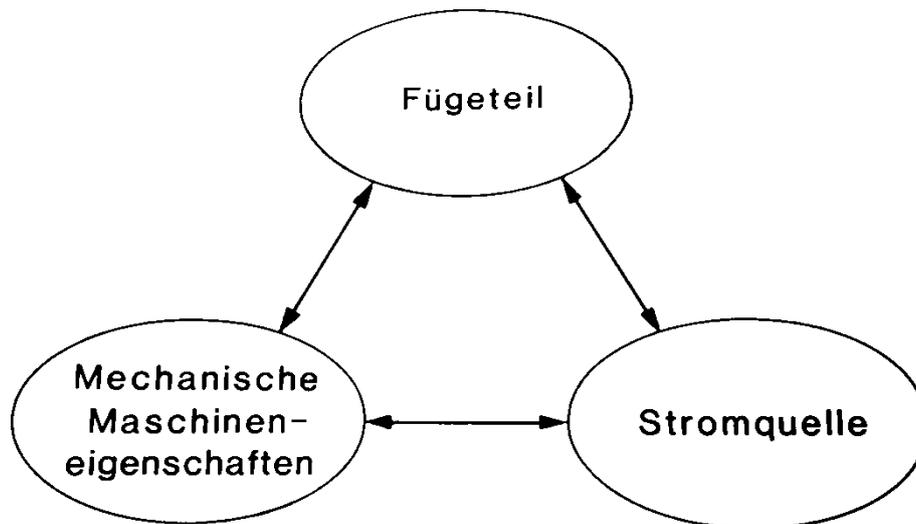


Abbildung 13: Zusammenwirken von Stromquelle, Fügeteil und mechanische Maschineneigenschaften beim Widerstandsschweißen. [1]

Über die thermischen und mechanischen Werkstoffeigenschaften der Fügeteile werden Maschinendynamik und Erwärmungsprozess miteinander gekoppelt. So haben z.B. Fügeteilwerkstoff und -geometrie im Zusammenwirken mit dem Schweißstrom Einfluss auf das Erwärmungsverhalten der Fügeteile und deren Erweichung, und somit auch auf den Bewegungsablauf der Schweißwerkzeuge beim Nachsetzen. Die Fügeteile wirken dabei als mechanische Elemente im Kraftfluss der Schweißmaschine. [1]

2.4.1 Ablauf des Widerstandsschweißprozesses

Ein einfacher Widerstandsschweißprozess kann in drei Phasen gegliedert werden. Diese drei Phasen werden auch in Abbildung 14 dargestellt.

- Phase I: Mithilfe der Schweißelektrode wird Druck auf die beiden Fügeteile ausgeübt und eine definierte Kraft F aufgebracht.
- Phase II: Der Schweißprozess startet indem der Schweißstrom I ansteigt bis er ein gewisses Niveau erreicht wird, wo er für eine gewisse Zeit gehalten wird. Sind die Fügeteile zusammengeschweißt wird der Schweißstrom abgeschaltet.

- Phase III: Der eigentliche Schweißprozess ist vollendet und das Werkstück kühlt aus. Die Kraft F wird noch eine Zeit lang aufrechterhalten. Dieses Nachdrücken soll Risse in der Schweißstelle verhindern.

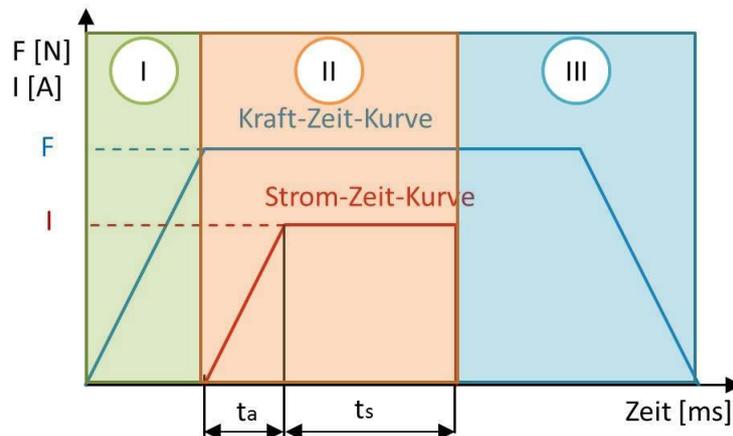


Abbildung 14: Kraft- und Strom-Zeit-Diagramm des Widerstandsschweißprozesses

2.4.2 Wärmeentwicklung beim Widerstandsschweißen

Der Schweißstrom, die kennzeichnende Größe beim Schweißvorgang, wird über die Elektroden zugeführt. Für die Wärmeentwicklung in einem stromdurchflossenen Leiter gilt das Joule'sche Gesetz:

$$Q_J = \int_0^t I^2(t) R(t) dt$$

Formel 1: Joule'sches Gesetz

Q_J = Joule'sche Wärme

R = Ohm'scher Widerstand

I = Stromstärke

t = Zeit

Durch das Joule'sche Gesetz ergibt sich somit, dass an der Stelle mit dem größten Teilwiderstand im Stromkreis die größte Wärmemenge entsteht. Daher müssen die Teilwiderstände im Bereich der Fugestelle am größten sein, während alle übrigen Teilwiderstände kleiner sein müssen. Dies ist möglich, wenn die Elektroden sowie die Kabel der Stromzuführung ausreichend große Querschnitte aufweisen und eine möglichst gute elektrische Leitfähigkeit besitzen. Außerdem sind die Übergangswiderstände zwischen Elektrode und Fügeteile klein zu halten. Die Voraussetzung dafür

sind saubere Elektroden- und Werkstückoberflächen, sowie möglichst geringe Oberflächenrauigkeiten. [1]

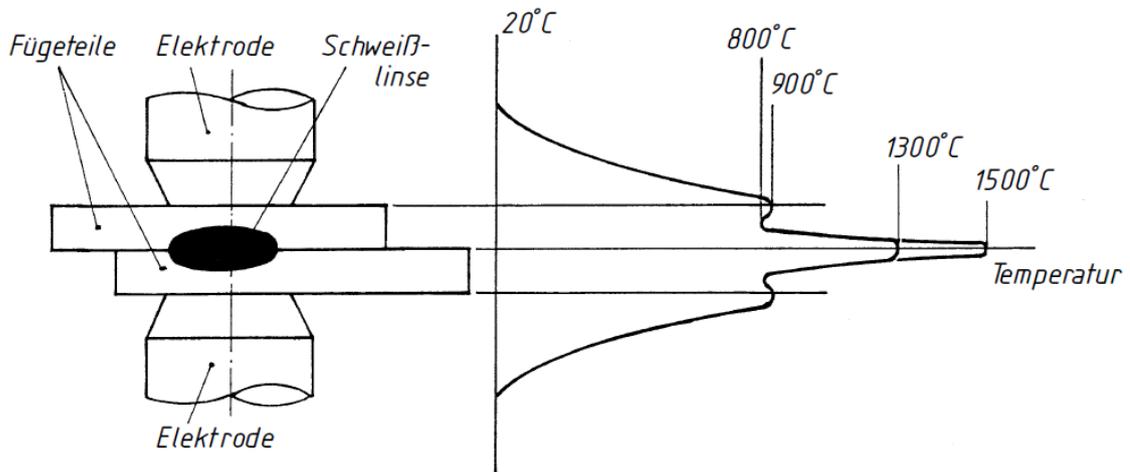


Abbildung 15: Temperaturverlauf (schematisch) in den Fügeteilen beim Widerstandsschweißen [12]

Wenn zu geringer Schweißstrom verwendet wird, leiten die Fügeteile und die Elektroden die gesamte Wärmemenge weg von der Fügestelle und kein Schweißpunkt entsteht. [13]

2.4.3 Elektroden und Elektrodenkraft

Der elektrische Widerstand an der Fügestelle setzt sich aus einer Vielzahl von Einzelwiderständen zusammen. Die Anzahl der Einzelkontakte hängt, außer von der Oberflächenrauigkeit, auch von der Elektrodenkraft ab, mit der die zu verschweißenden Teile zusammengepresst werden. Daher hängt auch der Übergangswiderstand von der Elektrodenkraft ab. [1]

Eine zu kleine Elektrodenkraft erzeugt nicht den erforderlichen Kontakt zwischen den Fügeteilen und zwischen Elektroden und den Fügeteilen. In diesem Fall kann es zu Funkenbildung, Spritzern und einem schnellen Verschleiß der Elektroden kommen. Eine zu hohe Elektrodenkraft presst die Elektroden zu viel in die Fügeteile, sodass Kerben entstehen. Große Kerben vermindern die Festigkeit der Schweißverbindung. [13]

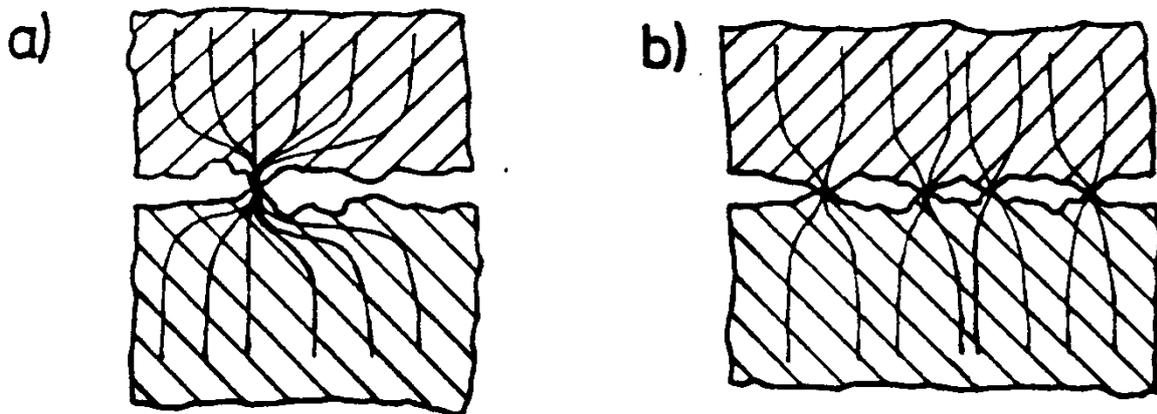


Abbildung 16: Stromfluss bei geringer (a) und starker (b) Anpresskraft. [1]

2.5 Design of Experiments (DoE)

Dieser Teil referenziert sich hauptsächlich auf TASCHENBUCH VERSUCHSPLANUNG – Produkte und Prozesse optimieren [14], geschrieben von Wilhelm Kleppmann und der Minitab® 17 Software. Andere Referenzen sind separat angegeben.

Die Schweißversuchsanlage steht für diese Arbeit nur für einen Monat zur Verfügung. Der Faktor Zeit ist also sehr limitierend für den experimentellen Teil dieser Arbeit, deshalb ist es wichtig, den richtigen Versuchsumfang festzulegen. Gerade wenn mehrere Faktoren und deren Einfluss auf das Ergebnis untersucht werden soll, wird die „One-factor-at-a-time“ – Methode unüberschaubar. Verändert man dagegen mehrere Faktoren gleichzeitig, verringert man nicht nur den Arbeitsaufwand, sondern bekommt auch Informationen über die Interaktionen einzelner Faktoren untereinander. Natürlich steigt dadurch auch die Komplexität. Also benötigt man eine systematische Vorgehensweise, damit die Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen gesehen werden kann.

2.5.1 Vorgehensweise DoE

Beim DoE werden die experimentellen Variablen in **Zielgrößen** und **Einflussgrößen** unterteilt. Zielgrößen beschreiben das Ergebnis eines Versuchs. Einflussgrößen sind Größen, die die Versuchsergebnisse möglicherweise beeinflussen. Aus einer Viel-

zahl von Einflussgrößen werden die vermuteten wesentlichen Größen ausgewählt. Diese Einflussgrößen heißen **Faktoren**. Nach der Auswahl der Faktoren müssen die Werte festgelegt werden, die die Faktoren im Versuch annehmen sollen. Diese ausgewählten Werte heißen **Faktorstufen**.

2.5.2 Versuchspläne

In dieser Arbeit wurden folgende 3 Versuchspläne verwendet:

- vollständig faktorieller Versuchsplan
- fraktioneller faktorieller Versuchsplan
- zentral zusammengesetzter Versuchsplan

Der vollständig faktorielle Versuchsplan kombiniert jeden Faktor mit jeder Faktorstufe. Abbildung 17 zeigt einen vollständig faktoriellen Versuchsplan mit zwei Faktoren A und B auf je zwei Stufen, die mit – und + bezeichnet werden. Der Versuchsplan besteht aus $2^2 = 4$ Faktorstufenkombinationen und heißt daher auch 2^2 - Versuchsplan.

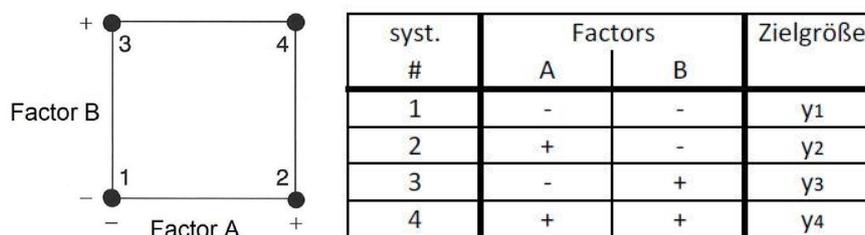


Abbildung 17: Zwei Faktoren auf je zwei Stufen (2^2 - Versuchsplan) [14]

Die Ergebnisse für die vier Faktorstufenkombinationen sind mit y bezeichnet. Der Effekt der Faktoren kann wie folgt berechnet werden:

$$Effekt A = \frac{y_2 + y_4}{2} - \frac{y_1 + y_3}{2} \qquad Effekt B = \frac{y_3 + y_4}{2} - \frac{y_1 + y_2}{2}$$

Formel 2: Effekt A und B [14]

Analog kann man den Effekt der Wechselwirkung AB berechnen:

$$Effekt AB = \frac{y_4 - y_3}{2} - \frac{y_2 - y_1}{2} = \frac{y_1 - y_2 - y_3 + y_4}{2}$$

Formel 3: Wechselwirkung [14]

Erweitert man den Versuchsplan, so verdoppelt sich mit jedem neuen Faktor die Anzahl der Faktorkombinationen. Für k Faktoren auf 2 Stufen erhält man $m=2^k$ Faktorkombinationen

Tabelle 2: Vollständig faktorieller Versuchsplan [14]

syst. #	Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	...
1	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	-
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	-	-	+	-
11	-	+	-	+	-
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	-
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	-

Bei vollständig faktoriellen Versuchen nimmt die Anzahl der Faktorstufenkombinationen mit der Anzahl der Faktoren k sehr schnell zu. Bei den fraktionellen faktoriellen Versuchsplänen werden anstelle von „höheren“ Wechselwirkungen weitere Faktoren untersucht. Dadurch bleibt die Anzahl der Faktorstufenkombinationen unverändert, während die Anzahl der Faktoren erhöht wird.

Beispiel:

Bei 4 Faktoren ergeben sich mit dem vollständig faktoriellen Versuchsplan $2^4 = 16$ Faktorkombinationen. Verwendet man die fraktionelle faktorielle Versuchsplanung, erhält man bei der Berechnung von Effekt A in Wirklichkeit die Summe A + BCD. Die Effekte von A und BCD können nicht getrennt werden.

Dadurch ergeben sich folgende Summeneffekte:

- | | | |
|----|------|--------------|
| 1: | A | + BCD |
| 2: | B | + ACD |
| 3: | C | + ABD |
| 4: | D | + ABC |
| 5: | AB | + CD |
| 6: | AC | + BD |
| 7: | AD | + BC |
| 8: | ABCD | + Mittelwert |

Bei 4 Faktoren ergibt sich ein 2^{4-1} – Plan mit 8 Faktorkombinationen.

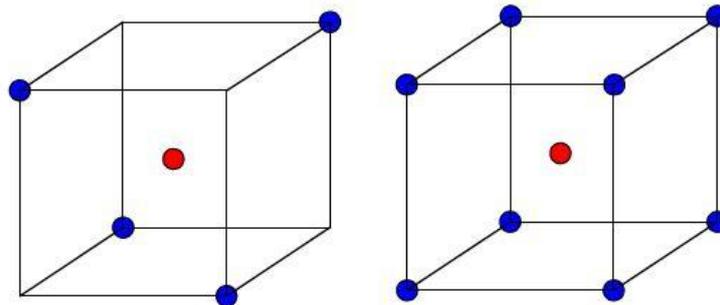


Abbildung 18: Unterscheid zwischen fraktionelle (links) und vollständig (rechts) faktoriellen Versuchsplan

Die oben genannten Versuchspläne beschreiben ein lineares Gleichungssystem, das daraus resultierende Model ist also linear.

Allerdings ist ein nicht-lineares Model entscheidend, wenn z.B. die Lage eines Maximums gesucht wird. Dabei werden oft zentral zusammengesetzte Versuchspläne (siehe Abbildung 19) verwendet. Hierzu wird ein vollständig faktorieller Versuchsplan (Würfel, blau), ein „Stern“ (grün) und ein „Zentrum“ (rot) zusammengefügt.

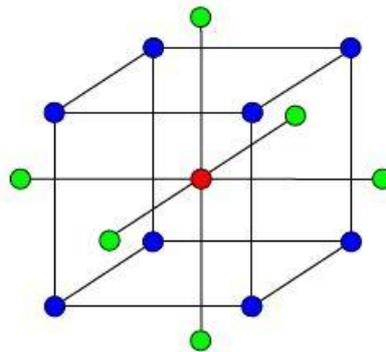


Abbildung 19: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan mit 3 Faktoren [15]

Tabelle 3 zeigt eine Liste der Faktorstufenkombination für $k=3$. Die Faktorstufen sind analog zur Darstellung des vollständig faktoriellen Versuchswertes (siehe Abbildung 17) mit den normierten Werten ± 1 , 0 und $\pm\alpha$ bezeichnet. Je nach Zielsetzung kann α verschiedene Werte annehmen. [14]

Tabelle 3: Faktorstufenkombinationen eines zentral zusammengesetzten Versuchsplan für $k = 3$ Faktoren [14]

syst. #	Factor A	Factor B	Factor C	Comment
1	-1	-1	-1	"Cube" fully factorial
2	1	-1	-1	
3	-1	1	-1	
4	1	1	-1	
5	-1	-1	1	
6	1	-1	1	
7	-1	1	1	
8	1	1	1	
9	$-\alpha$	0	0	"Star" every factor separate
10	α	0	0	
11	0	$-\alpha$	0	
12	0	α	0	
13	0	0	$-\alpha$	
14	0	0	α	Centre (4 times)
15	0	0	0	
16	0	0	0	
17	0	0	0	
18	0	0	0	

Um zu verhindern, dass ein Trend oder eine andere unerkannte Änderung der Ergebnisse die Schätzung der Effekte der Faktoren verfälscht, werden die Einzelversuche in jedem Block in zufälliger Reihenfolge durchgeführt. Man spricht von **Randomisierung**. [14]

2.5.3 Analyse

Um das Ergebnis graphisch darzustellen kann das Haupteffektdiagramm verwendet werden. Es zeigt welchen Effekt die einzelnen Faktoren haben und vergleicht die relative Auswirkung dieser.

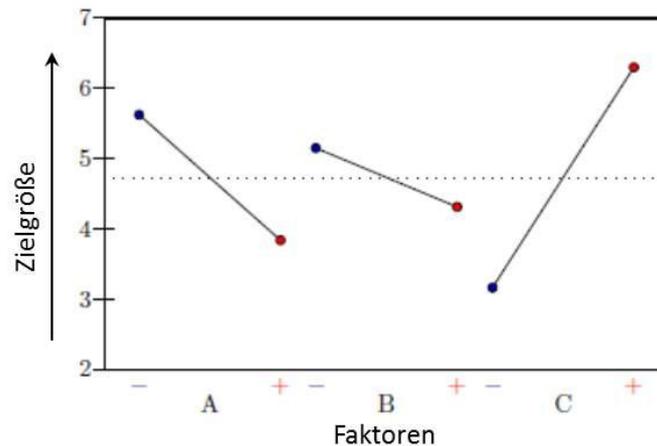


Abbildung 20: Beispiel eines Haupteffektdiagramms mit 3 Faktoren (A, B, C) [16]

Abbildung 20 zeigt ein Beispiel eines Haupteffektdiagramms mit 3 Faktoren (A, B und C). Die flache Linie von Faktor B bedeutet, dass hier ein sehr geringer Einfluss auf die Zielgröße herrscht. Der sehr steile Anstieg von Faktor C sagt aus, dass dieser Faktor einen sehr großen Einfluss auf die Zielgröße hat.

Auch Wechselwirkungen können grafisch dargestellt werden. Dies geschieht im sogenannten Wechselwirkungsdiagramm (siehe Abbildung 21).

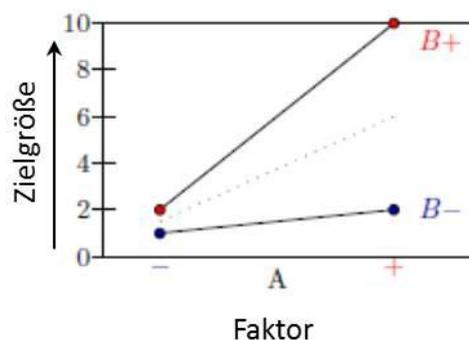


Abbildung 21: Schematische Darstellung eines Wechselwirkungsdiagramms [16]

Die Wechselwirkung entspricht der Steigerungsänderung. Sind die eingezeichneten Linien parallel, gibt es keine Wechselwirkung. Bei starken Wechselwirkungen können sich die Linien auch kreuzen.

Eine weitere hilfreiche Darstellung ist das Oberflächenmodell (Abbildung 22). Es ist eine dreidimensionale Darstellung, wo die Oberfläche das Verhalten der Zielgröße widerspiegelt.

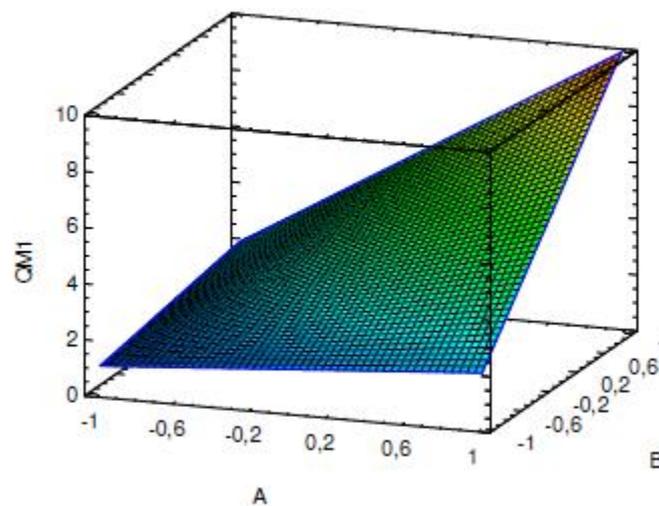


Abbildung 22: Beispiel eines Oberflächenmodells [16]

3 Versuchsaufbau

3.1 Versuchsmaterial

Für den experimentellen Teil dieser Arbeit stehen mehrere Werkstoffe für das Stammbblatt und den Hartmetallzahn zur Verfügung. Diese wurden bereits im Vorhinein definiert, um zu Beginn der Versuche alle Materialien zur Verfügung zu haben.

3.1.1 Kreissägeblätter

3.1.1.1 Geometrie

Abbildung 23 zeigt die Geometrie des Kreissägeblattes. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen bei Dünnschnittsägen eingesetzt werden, darum hat das Stammbblatt eine Dicke von nur 0,9mm. Auf jeden Kreissägeblatt ist Platz für 20 Schweißversuche. Es wurden auch 2 Kontaktsitzgeometrien definiert, welche in Abbildung 24 dargestellt werden.

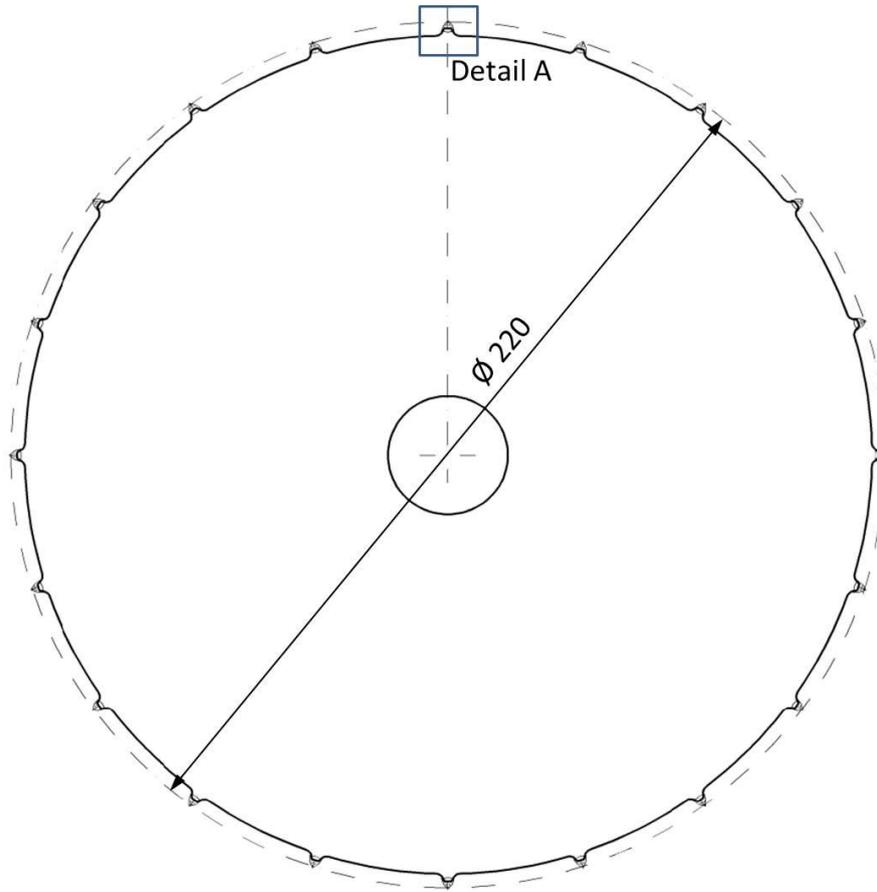


Abbildung 23: Kreissägeblatt im Maßstab 1:2

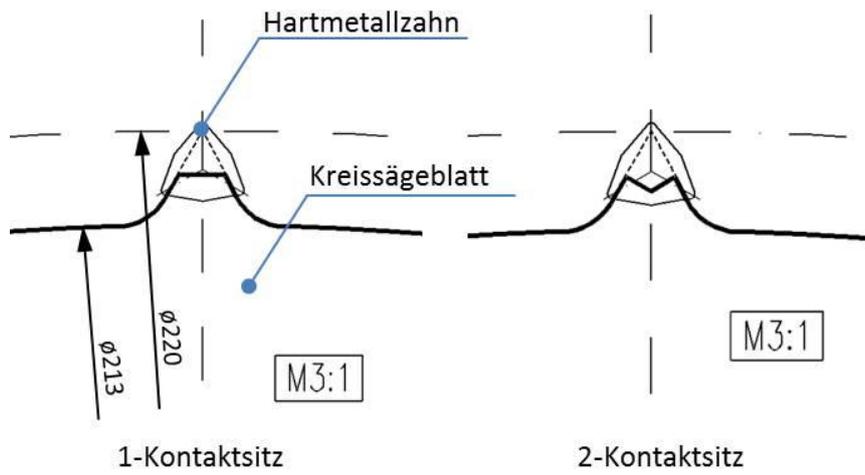


Abbildung 24: Detail A: Geometrie der beiden Plattensitze

3.1.1.2 Werkstoffe

Für die Stammbblätter stehen folgende Werkstoffe zur Verfügung:

- 80CrV2
- 75Cr1
- 27MnCrB5-2
- 48CrMoNiV4-4
- X20CrMo13

In Tabelle 4 sieht man die chemische Analyse dieser Auswahl. Die Werkstoffe **80CrV2** und **75Cr1** sind Standard-Stammbblattqualitäten, deshalb gelten diese als Zielwerkstoffe und haben eine hohe Priorität bei den Schweißversuchen. Bei den anderen Stammbblattmaterialien handelt es sich um Werkstoffe, die bei Bandsägen Verwendung finden.

Tabelle 4: Chemische Analyse der Stammbblattmaterialien [17]

Kurzname	Mat.no.	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	V [%]	B [%]
80CrV2	1.2235	0,75- 0,85	0,15- 0,35	0,30- 0,50	<0,025	<0,025	0,40- 0,60				
75Cr1	1.2003	0,70- 0,80	0,25- 0,50	0,60- 0,80	<0,030	<0,030	0,30- 0,40				
27MnCrB5-2	1.7182	0,24- 0,30	<0,40	1,10- 1,40	<0,035	<0,040	0,30- 0,60				0,0008- 0,0050
48CrMoNiV4-4	1.6944	0,35- 0,40	0,15- 0,35	0,50- 0,80	<0,015	<0,010	0,65- 0,90	0,30- 0,40	0,70- 0,80	0,08- 0,15	
X20CrMo13	1.4120	0,17- 0,20	<1,00	<1,00	<0,040	<0,015	12,0- 14,0	0,90- 1,30	<1,00		

3.1.2 Hartmetall

Die Hartmetallgeometrie ist eine Standardgeometrie und wegen ihrer Größe an das Dünnschnittkreissägeblatt angepasst. Die symmetrische Form dieses Zahnes macht die Handhabung relativ einfach. Abbildung 25 zeigt die Zahngeometrie.

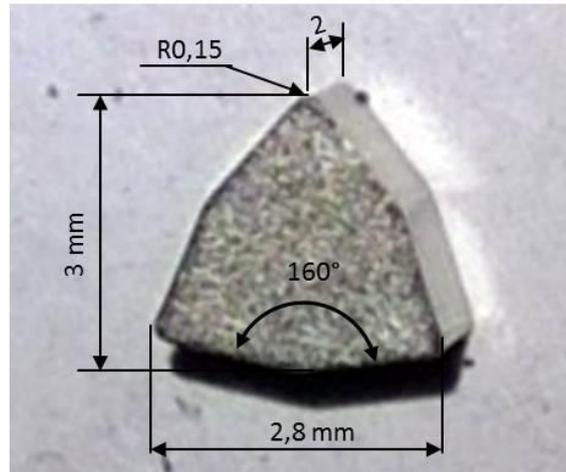


Abbildung 25: Hartmetall - Zahngeometrie

Die verwendeten Hartmetallsorten werden vom Hersteller Ceratizit S.A. bezogen. Sie bestehen aus Wolframcarbiden und einem Binder aus Kobalt. Zusätzlich sind diese mittels PVC-Verfahren mit einer 3 µm dicken Nickelschicht überzogen. Die Hartmetall-Sorte **HC10** gilt, aufgrund ihrer höheren Härte, als Zielwerkstoff und hat deshalb die höhere Priorität. Tabelle 5 zeigt die verwendeten Hartmetallsorten mit einigen typischen Kennwerten.

Tabelle 5: Verwendete Hartmetall-Qualitäten [18]

Sortenname	ISO Code	Binder Co [%]	WC [%]	Härte [HV10]	Biegebruchfestigkeit [MPa]	K _{1c} [MPa·m ^{1/2}]
HC10	K10	5,6	Rest	1760	2150	9,2
CTS18D	K20- K40	9,0	Rest	1610	3800	11,0

3.1.3 Schweißelektroden

Da nicht abgeschätzt werden kann, welchen Einfluss der Elektrodenwerkstoff auf die Schweißverbindung hat, werden folgende gängige Elektrodentypen untersucht:

- CuCrZr (0,5-1,2 % Cr, 0,03-0,3% Zr, Rest Cu)
- KW80 (80% W, 20% Cu)
- WL20 (98% W; 2% Lanthaloxid)



Abbildung 26: Schweißelektroden

3.2 Materialkombinationen

Tabelle 6 fasst nochmal alle geplanten Materialkombinationen (Hartmetall und Stammbblatt) zusammen und zeigt welche Priorität diese bei der Untersuchung haben.

Man sieht, dass die Standard-Stammbblattqualitäten in Verbindung mit der härteren Hartmetallsorte HC 10 die höchste Priorität bei den Schweißversuchen haben.

Tabelle 6: Geplante Materialkombinationen (Hartmetall und Stamblatt) mit ihrer Priorität (1...hoch, 10...niedrig)

	<i>HC10</i>	<i>CTS18-D</i>
80CrV2	1	3
75Cr1	2	4
27MnCrB5-2	5	8
48 CrMoNiV 4-4	6	9
X20 CrMo 13	7	10

3.3 Versuchsablauf

Der experimentelle Teil dieser Arbeit wird in 5 Phasen gegliedert. Abbildung 27 zeigt die zeitliche Abfolge der einzelnen Phasen in diesem Versuchsplan.

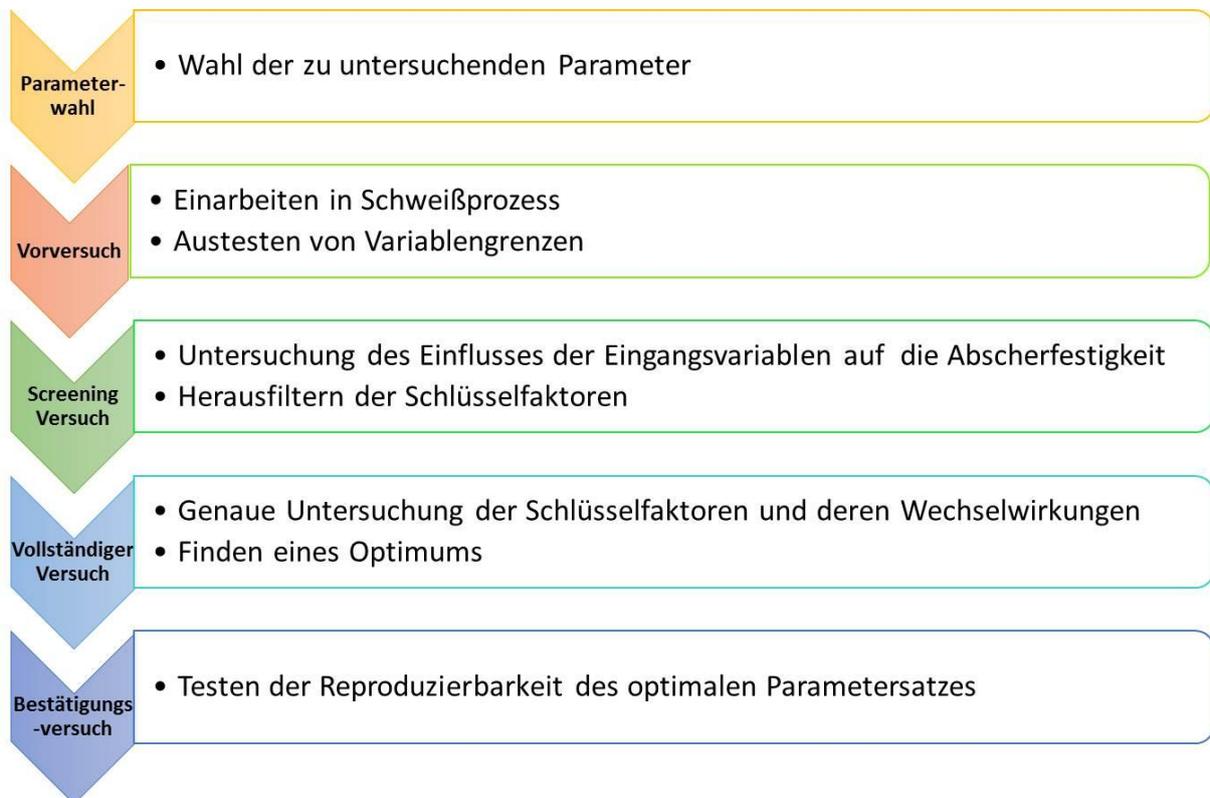


Abbildung 27: Versuchsplan

In jeder dieser Phase werden Entscheidungen getroffen, welche Auswirkungen auf die nächste Phase haben. Wie sich die einzelnen Phasen gegenseitig beeinflussen wird im Flussdiagramm in Abbildung 28 dargestellt.

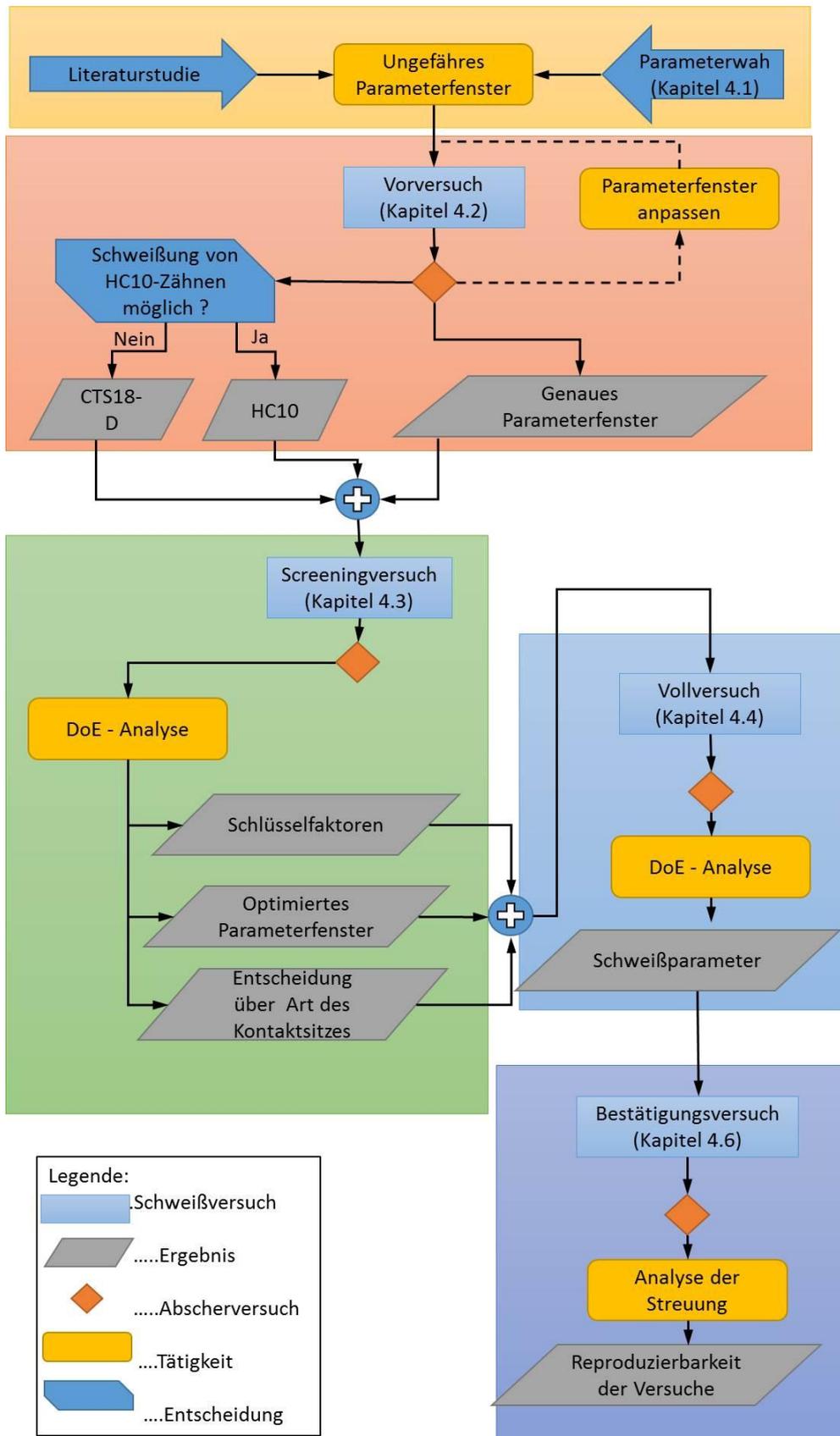


Abbildung 28: Flussdiagramm

Jede Schweißung durchläuft fünf Stufen (siehe Abbildung 29), welche nachfolgend beschrieben werden.



Abbildung 29: Die fünf Schritte einer Versuchsstufe

3.3.1 Der Schweißversuch

Die Komponenten der Schweißversuchsanlage kommen von der Firma Matuschek Meßtechnik GmbH und wurden von der Firma Lingl Schweißtechnik zusammengestellt. Zusätzlich wurde in Zusammenarbeit der beiden Firmen Lingl Schweißtechnik und Leitz GmbH & Co. KG eine Aufnahmevorrichtung für die Kreissägeblätter angefertigt. Die Passform der Elektroden wurde mittels Senkerodieren von der Leitz GmbH & Co. KG angefertigt.

Die Schweißversuchsanlage beinhaltet folgende Komponenten:

- SPATZBS-01 Bedienpult
- SPATZ+LSK200 Feinschweißkopf
- SPATZ+H9000 Hochfrequenz-Inverterstromquelle
- SPATZStudioNET Schweißsoftware
- Aufnahmevorrichtung
- Schweißelektrode
- handelsüblicher PC zur Steuerung

Das Arbeitsprinzip des Widerstandsschweißverfahrens wurde bereits in Kapitel 2.4 ausführlich erklärt. Während der Schweißung wird die Schweißstelle mit Stickstoff als Schutzgas umspült. Die Schutzgasdüse befindet sich auf der Vorrichtung gleich neben der Schweißstelle (siehe Abbildung 31). Schutzgas wird verwendet, um Reaktionen mit dem Luftsauerstoff zu reduzieren. Mittels Unterdruck wird der Hartmetall-Zahn in der Negativ-Passform der Schweißelektrode gehalten. Die genaue Geometrie des Hartmetall-Zahnes ist in Abbildung 25 dargestellt. Zeichnungen der Kreissägeblätter sind im Anhang zu finden (siehe Seite 87).

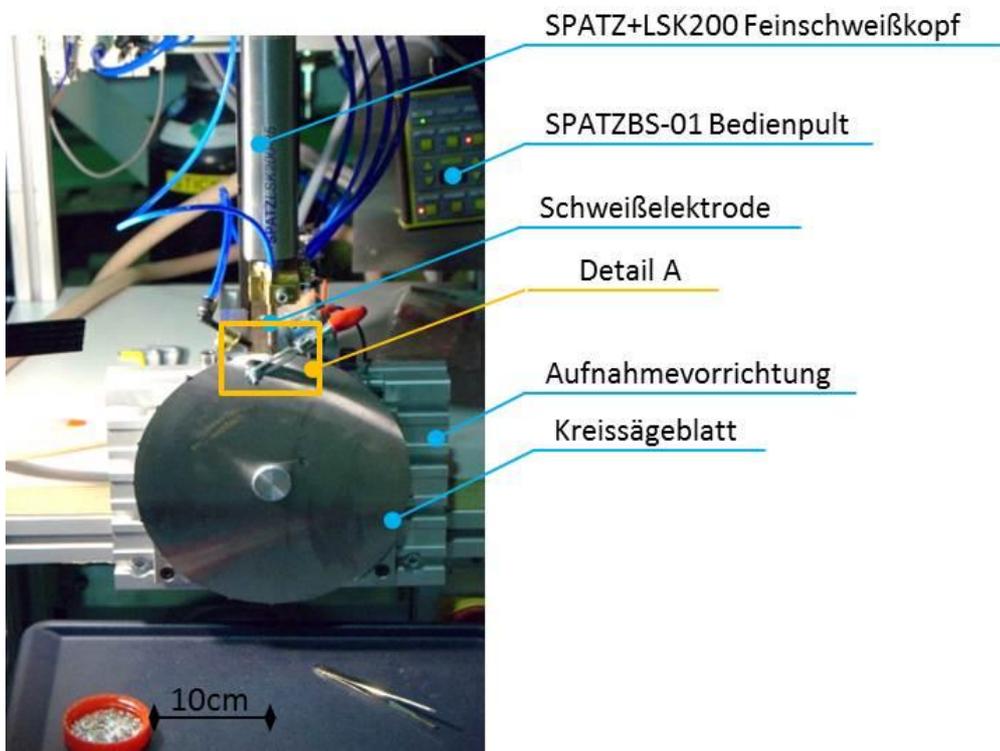


Abbildung 30: Schweißanlage

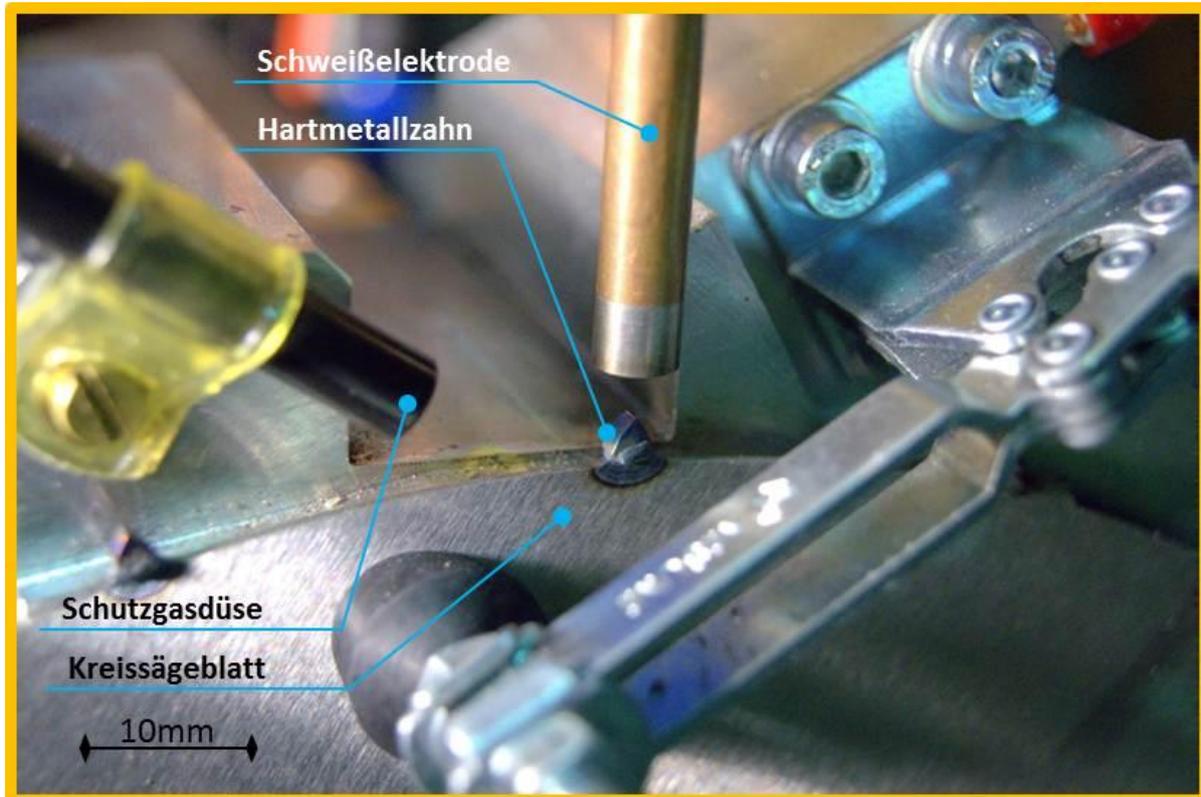


Abbildung 31: Detail A der Schweißanlage

3.3.2 Die Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung dient dazu, Spannungen im Kreissägeblatt abzubauen und entstandener Martensit anzulassen. Durch die hohen Temperaturen beim Löten und Schweißen entsteht im Stahlträger lokal Austenit, der sich bei der Abkühlung in Martensit umwandelt. Die dadurch entstehende Versprödung des Stahlträgers ist unerwünscht, deshalb muss dieser Martensit angelassen werden. Die Anlasstemperatur ist auf die Standardstahlsorten 75Cr1 und 80CrV2 abgestimmt und beträgt, für das Erreichen der erforderlichen Endhärte, 450° C. Abbildung 32 zeigt die Temperaturkurve der Wärmebehandlung.

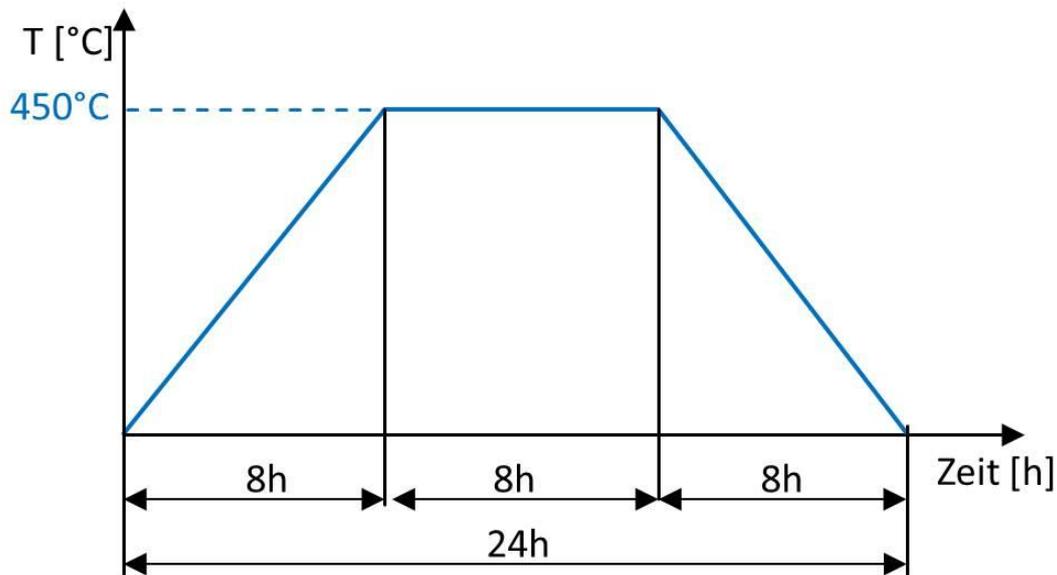


Abbildung 32: Temperaturkurve der Wärmebehandlung

Die langen Aufheiz-, Halte- und Abkühlzeiten erklären sich dadurch, dass die Kreissägeblätter zu großen Paketen zusammengefasst werden und also große Bündel in den Ofen kommen. Somit wird eine große Masse wärmebehandelt, die lange Zeiten benötigt um eine gleichmäßige Wärmeverteilung in jedem Kreissägeblatt zu gewährleisten.

3.3.3 Das Planschleifen

Bevor die Schweißproben zur Abscherprüfung kommen, müssen sie noch in Dickenrichtung plangeschliffen werden. Der Hartmetallzahn hat in Dickenrichtung eine Abmessung von 2 mm, der Stahlträger jedoch nur 0,9 mm. Außerdem entsteht während des Schweißprozesses ein Grat, der auch abgeschliffen werden muss. Dadurch wird gewährleistet, dass die Schweißprobe einwandfrei in der Abschervorrichtung positioniert werden kann.

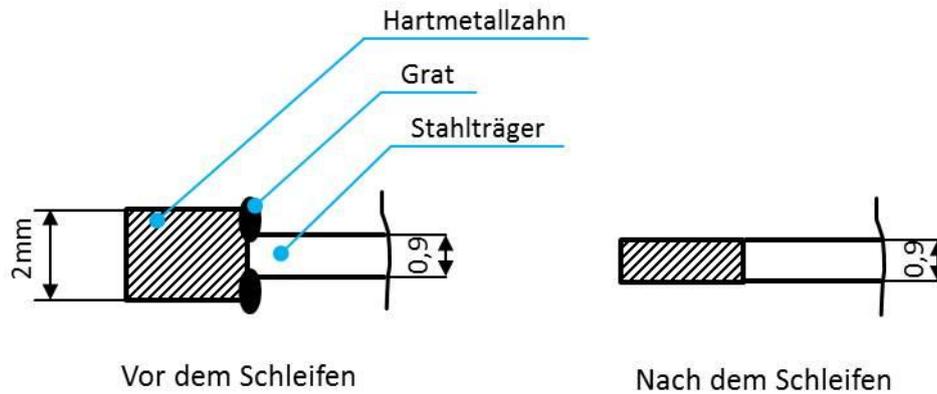


Abbildung 33: Schleifprozess

3.3.4 Die Abscherprüfung

Die Abscherprüfung spiegelt zwar nicht die eigentliche Belastung des Zahnes im Sägebetrieb wieder, aber sie ist eine sehr einfache, reproduzierbare Prüfung, bei der schon sehr viele Vergleichswerte von gelöteten Verbindungen vorhanden sind. Dadurch lässt sich die geschweißte Verbindung gut mit der gelöteten Verbindung vergleichen.

Die Proben werden mittels Laserschnitt aus dem Stammbblatt herausgeschnitten. Auf jeden Stammbblatt finden 20 Schweißproben Platz.

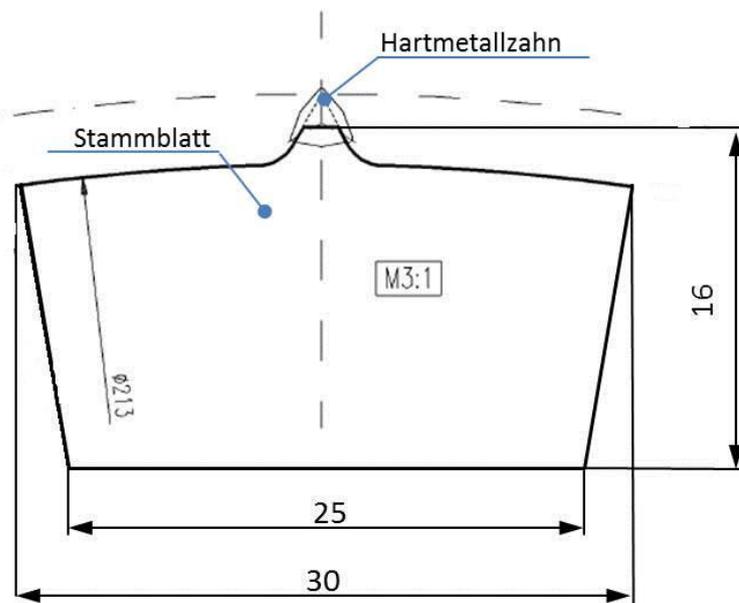


Abbildung 34: Abscherprobe im Maßstab 3:1

Abbildung 35 zeigt den schematischen Aufbau der Abschervorrichtung. Die Schweißprobe wird auf Anschlag in die Abschervorrichtung eingelegt. Die Hartmetallschneidspitze muss dabei nach außen zeigen und so positioniert werden, dass sie vom Stempel abgedrückt werden kann. Eine Feststellschraube fixiert die Schweißprobe in der Vorrichtung. Nun wird der Handhebel der Abscherpresse betätigt (siehe Abbildung 36). Dadurch fährt der Stempel nach unten und schert den Hartmetallzahn vom Stahlträger ab. Eine Kraftmessdose misst die dabei benötigte Kraft, welche auf einem Ablesegerät wiedergegeben wird.

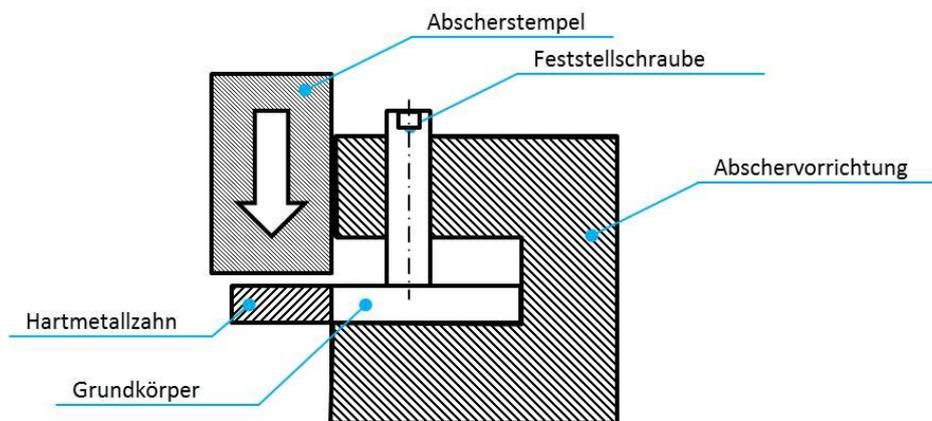


Abbildung 35: Abschervorrichtung schematischer Aufbau



Abbildung 36: Handhebelpresse

3.3.5 Das Auswerten

Zum Auswerten wird nach der Methode Design of Experiments (DoE) vorgegangen, welche in Kapitel 2.5 näher beschrieben ist.

3.3.6 Beschriftungssystem

Um die Schweißproben nachverfolgen zu können wurde ein Beschriftungssystem entwickelt und durchgeführt. Dieses wurde wie folgt ausgeführt:

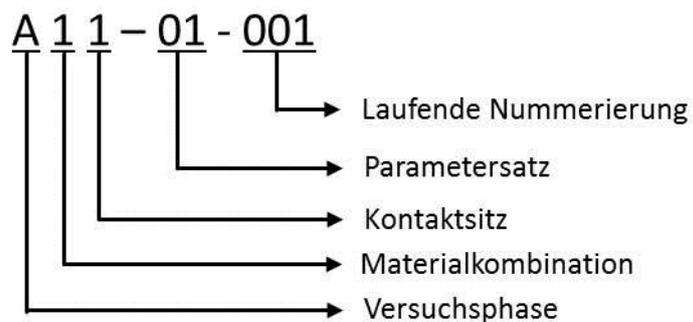


Abbildung 37: Beschriftungssystem

Tabelle 7: Beschriftungssystem

Versuchphase	
A	Vorversuch
B	Screeningversuch
C	Vollversuch
D	Bestätigungsversuch
E	Versuch mit langer Temperaturführung
Materialkombination	
1	75Cr1 + HC10
2	75Cr1 + CTS18-D
3	80CrV2 + HC10
4	80CrV2 + CTS18-D
5	27MnCrB5-2 + HC10
6	27MnCrB5-2 + CTS18-D
7	48 CrMoNiV 4-4 + HC10
8	48 CrMoNiV 4-4 + CTS18-D
9	X20 CrMo 13 + HC10
0	X20 CrMo 13 + CTS18-D
Kontaktsitz	
1	1-Kontaktsitz
2	2-Kontaktsitz

Abbildung 37 und Tabelle 7 zeigen das verwendete Beschriftungssystem. Die komplette Tabelle, indem auch die Parametersätze enthalten sind, ist im Anhang zu finden. Das abschließende Element der Beschriftung bildet eine fortlaufende Nummerierung. Falls ein Schweißversuch mehrmals wiederholt wird, kann somit immer noch jede Schweißprobe einer Versuchsnummer zugeordnet werden.

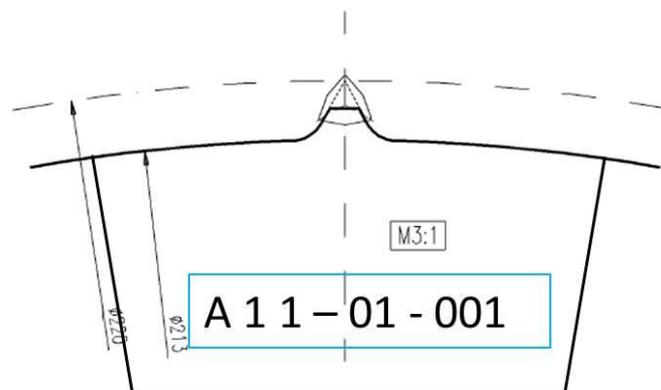


Abbildung 38: Beispiel einer Beschriftung

4 Versuchsdurchführung

4.1 Parameterauswahl

Das Arbeitsprinzip des Widerstandsschweißens wurde bereits in Kapitel 2.4 beschrieben. Natürlich gibt es beim Schweißprozess viele Einflussgrößen, die Auswirkungen auf die Zielgröße haben. Als Zielgröße wurde die **Abscherfestigkeit** der Schweißverbindung definiert

Gemeinsam mit Mitarbeitern der Leitz GmbH wurden, in einem Brainstorming, alle Einflussgrößen erarbeitet und anschließend in einem Ishikawa - Diagramm dargestellt.

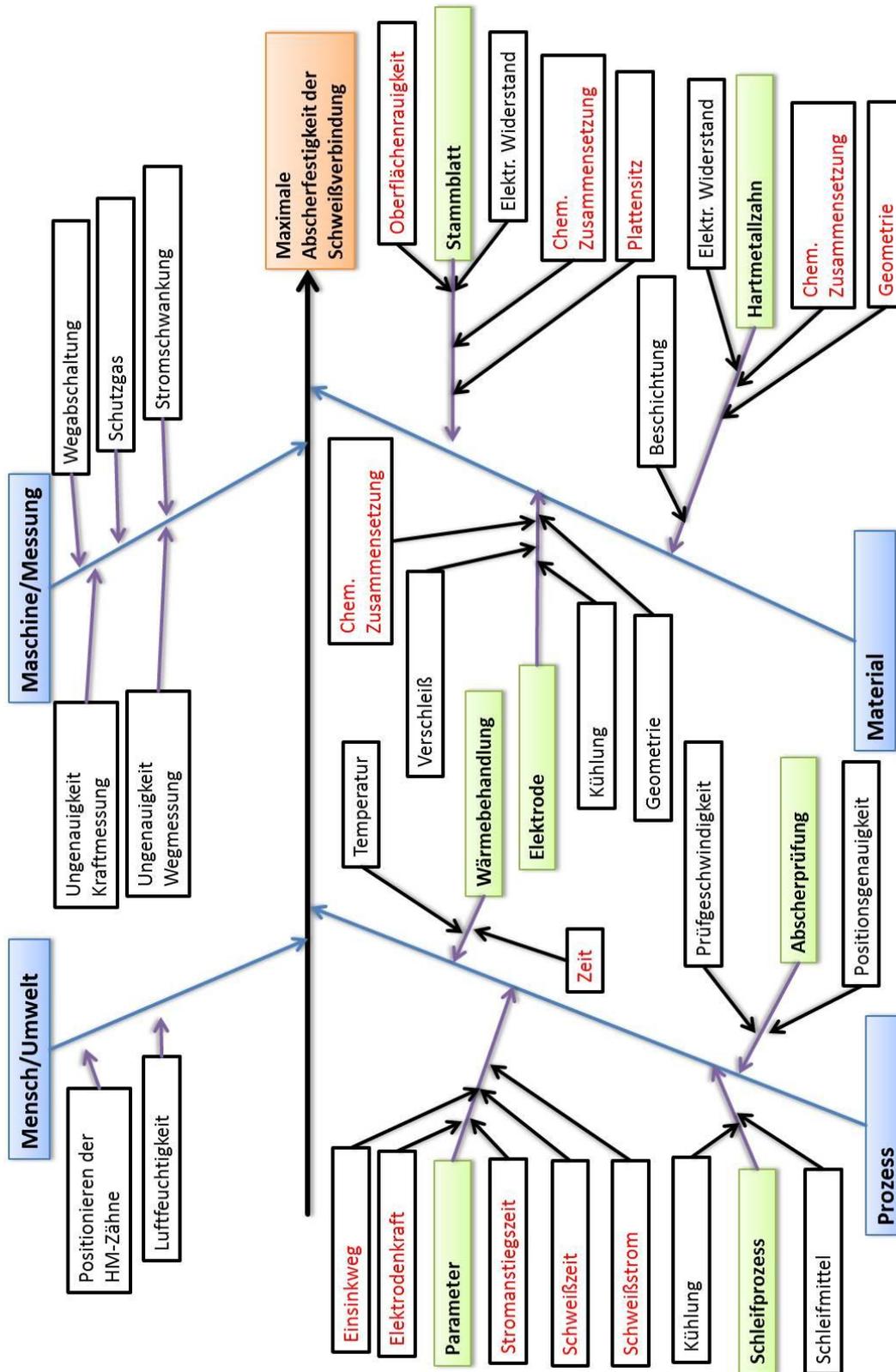


Abbildung 39: Ishikawa – Diagramm, mögliche Einflussgrößen auf die Abscherfestigkeit der Widerstandsschweißverbindung.

Wie im Ishikawa-Diagramm zu sehen ist, wurden viele potentielle Einflussgrößen herausgefiltert. Da das Thema dieser Masterarbeit das Optimieren des Widerstandsschweißens von Hartmetall auf Stahlträgern ist, wurde im Anschluss eine Selektion der Einflussgrößen durchgeführt.

Die ausgewählten Einflussgrößen sind in Abbildung 40 nochmals übersichtlich dargestellt.

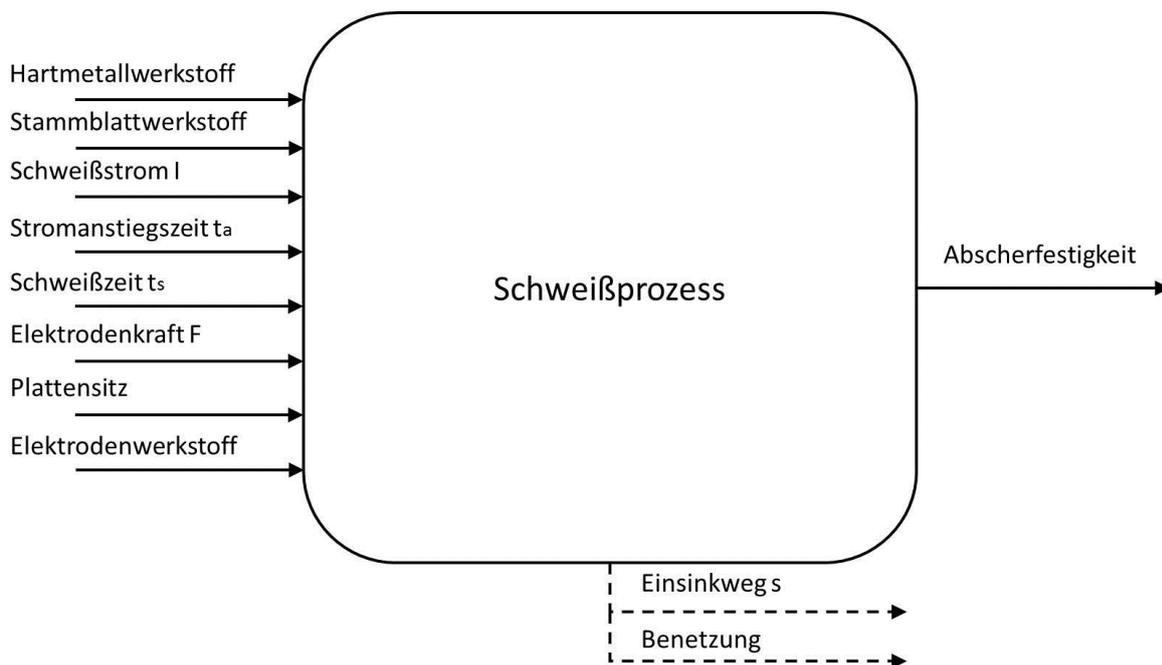


Abbildung 40: Ausgewählte Einflussgrößen und die Zielgröße des Schweißprozesses

Neben Elektroden-, Stammbblatt- und Hartmetallwerkstoff zählen die Strom- und Kraft-Zeit-Kurve (Elektrodenkraft, Schweißstrom, Schweißanstiegszeit, Schweißzeit) zu den betrachteten Einflussgrößen. Abbildung 41 zeigt den Kraft-Zeit-Verlauf sowie den Strom-Zeit-Verlauf des Widerstandsschweißprozesses.

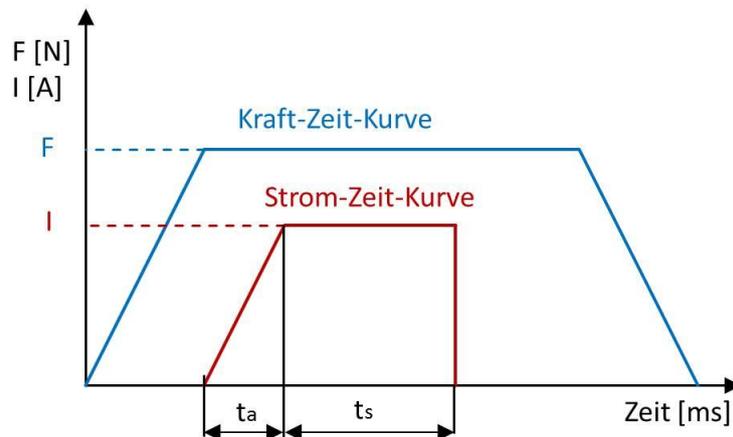


Abbildung 41: Kraft- und Strom-Zeit-Diagramm des Widerstandsschweißprozesses

4.2 Vorversuch

Bei den Vorversuchen geht es darum, die Schweißmaschine kennen zu lernen und den Schweißbereich (siehe Abbildung 42) festzustellen. Die Grenzen des Schweißbereiches werden als Variablengrenzen für die weitere Untersuchung in den Screening-Versuchen verwendet. Dort werden diese als Faktorstufen eingesetzt.

Um Zeit zu sparen wurde auf eine Wärmebehandlung sowie das Planschleifen der Fügeverbindung verzichtet. Eine Fügeverbindung liegt innerhalb des Schweißbereiches, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt werden:

1. Während des Schweißprozesses entstehen keine Spritzer
2. Bestehen des Daumentestes: Der angeschweißte Hartmetall-Zahn darf sich nicht durch bloßes Drücken mit dem Daumen lösen.

4.2.1 Der Schweißbereich

Der Schweißbereich wird durch zwei Grenzen definiert. Die untere Grenze ist dadurch gekennzeichnet, dass sich noch keine Schweißverbindung bildet. Bei der oberen Grenze, auch **Spritzergrenze** genannt, entstehen Schweißspritzer und eine hohe thermische Belastung für die Elektrode. Beides soll vermeiden werden.

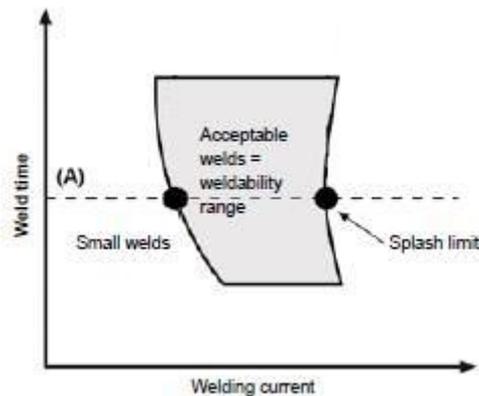


Abbildung 42: Schweißbereich einer Widerstandsschweißung [13]

Um den Schweißbereich zu verstehen, hilft es den zeitlichen Ablauf einer Widerstandsschweißung zu kennen.

Dieser gliedert sich in 4 Phasen [13]:

1. Wärmeeintrag: zu diesem Zeitpunkt hat sich noch kein Schweißpunkt gebildet. Die Elektrodenkraft und die steigende Temperatur glätten die Oberflächenrauigkeiten der Werkstücke und vermindern den elektrischen Widerstand.
2. Schnelles Wachstum der Schweißlinse: Es entsteht ein Schmelzbad, das sehr schnell anwächst. Der elektrische Widerstand des flüssigen Metalls ist höher als der Widerstand von Metall im festen Zustand. Dies erhöht den Gesamtwiderstand.
3. Das Wachstum der Schweißlinse wird langsamer. Das Wachstum des Schmelzbades ist begrenzt durch die kühlende Elektrode und der größer werdenden Grenzfläche des Schmelzbades.
4. Spritzer: Die Schmelzbadgröße wächst so schnell, sodass es zu unkontrolliertem Ausstoß von geschmolzenem Metall kommt. Eine signifikante Menge an geschmolzenem Metall spritzt von der Schweißstelle weg.

4.2.2 Ergebnis

Tabelle 8 zeigt das Ergebnis der Vorversuche und somit den Schweißbereich.

Tabelle 8: Ergebnis der Vorversuche

Parameter		min. – Wert	max. - Wert
Schweißstrom	I [A]	700	1000
Stromanstiegszeit	t_a [ms]	10	80
Schweißzeit	t_s [ms]	30	100
Elektrodenkraft	F [N]	30	110

Bei folgenden Werten kommt es zur Spritzerbildung:

- Schweißstrom $I > 1000A$
- Elektrodenkraft $F < 30N$
- Stromanstiegszeit $t_a < 10ms$

Folgende Werte verhindern das Ausbilden einer Schweißverbindung:

- Schweißzeit $t_s < 30ms$
- Schweißstrom $I < 700A$
- Elektrodenkraft $F > 110N$

Die Hartmetallzähne haben dabei entweder gar keine Haftung am Stahlträger, oder eine nur so geringe, dass sie mit dem bloßen Daumen wieder abgedrückt werden können.

Die in Tabelle 8 ermittelten Werte gelten als Faktorstufen für den danach folgenden Screening-Versuch

4.3 Screening-Versuch

Die Screening-Versuche werden mittels 2-stufigen fraktionellen-faktoriellen Versuchsplans durchgeführt (beschrieben in Kapitel 2.5). Damit sollen die Faktoren und ihr Einfluss auf die Abscherfestigkeit untersucht werden. Der fraktionelle-faktorielle Versuchsplan wurde gewählt, um den Versuchsaufwand zu reduzieren, da Zeit ein

wichtiger und limitierender Faktor während des experimentellen Teils war. Als Faktorstufen gelten die Werte, die in den Vorversuchen als Schweißbereichsgrenzen ermittelt wurden (siehe Tabelle 8). Diese vier Faktoren ergeben beim fraktionellen faktoriellen 2^{4-1} –Plan 9 anstelle der 17 Parametersätze, die beim vollständig faktoriellen Versuchsplan ($2^4 = 16 + 1$ Zentralpunkt) entstanden wären.

Tabelle 9 zeigt den verwendeten Versuchsplan für die Schweißparameter (Schweißstrom I, Schweißanstiegszeit t_a , Schweißzeit t_s und Elektrodenkraft F). Neben den eben genannten Schweißparametern wurden auch unterschiedliche Materialkombinationen (nach Tabelle 6) und unterschiedliche Plattensitze (siehe Abbildung 24) untersucht. Abbildung 43 soll veranschaulichen, wie beim Ablauf der Screening Versuche vorgegangen worden ist.

Tabelle 9: Versuchsplan für die Schweißparameter

Nr.	I [A]	t_a [ms]	t_s [ms]	F [N]
1	0	0	0	0
2	-	-	-	-
3	+	-	-	+
4	-	+	-	+
5	+	+	-	-
6	-	-	+	+
7	+	-	+	-
8	-	+	+	-
9	+	+	+	+

„+“ steht für den Maximal-Wert, „-“ steht für den Minimalwert und „0“ für den Mittelwert zwischen Maximum und Minimum. Diese Werte können in Tabelle 8 abgelesen werden.

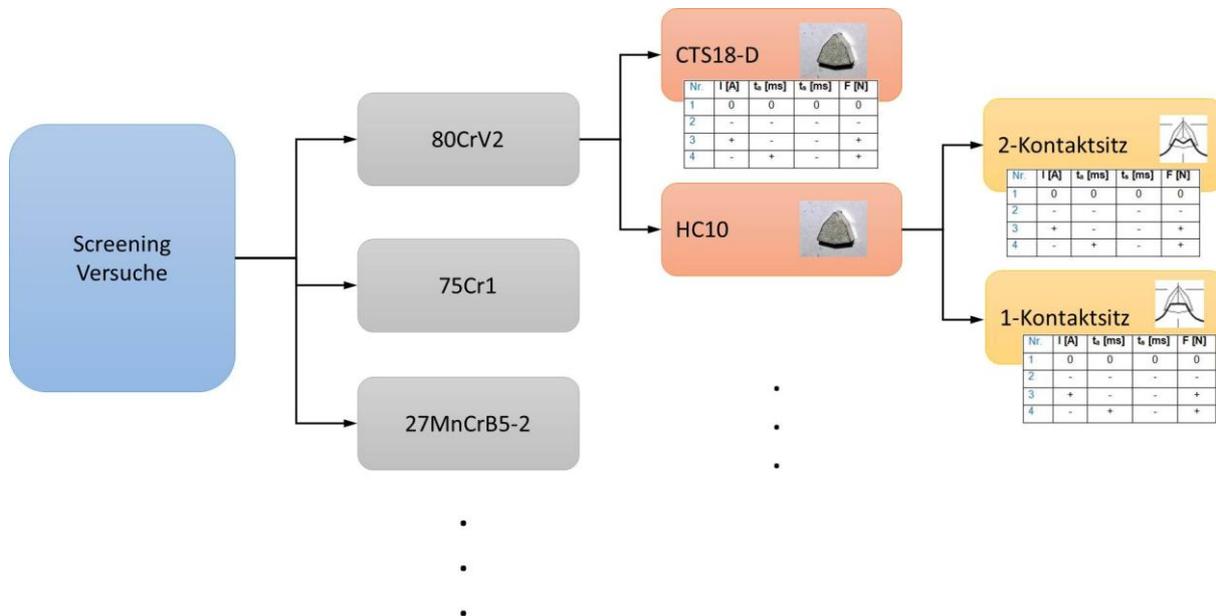


Abbildung 43: Aufteilung der Screeningversuche

Jede Stammblattqualität (grau) wurde jeweils mit den beiden Hartmetallqualitäten (orange) getestet. Zusätzlich wurden bei einer der beiden Materialkombinationen beide Plattensitze (gelb) untersucht, um auch diesen Einfluss festzustellen. Dazu ein Beispiel:

Auf der Stammblattqualität 80CrV2 wurden beide Hartmetallsorten getestet (HC10 und CTS18-D). Für beide Fälle wurde hier die 1-Kontaktsitz-Geometrie am Stammblatt verwendet. Zusätzlich wurde bei derselben Stammblattqualität für eine der beiden Hartmetallsorten eine Versuchsreihe mit 2-Kontaktsitz-Geometrie getestet. Somit wird der Versuchsplan (siehe Tabelle 9) bei jeder Stammblattqualität 3-mal durchgeführt.

4.3.1 Einsinkweg

Während der Versuche wurde auch der Einsinkweg aufgezeichnet. Startpunkt der Messung ist wenn der Hartmetallzahn das Stammblatt berührt. Anschließend wird gemessen wie weit der Hartmetallzahn in das Stammblatt einsinkt. Der Einsinkweg resultiert aus der Elektrodenkraft und der Wärmeentwicklung. Je größer die Elektrodenkraft und die Wärmeentwicklung, desto tiefer ist der Einsinkweg.

Der Schweißprozess wurde abgebrochen wenn eine Tiefe von 1mm erreicht wurde. Diese Grenze wurde gewählt um eine Beschädigung der Vorrichtung und der Schweißelektrode zu vermeiden.

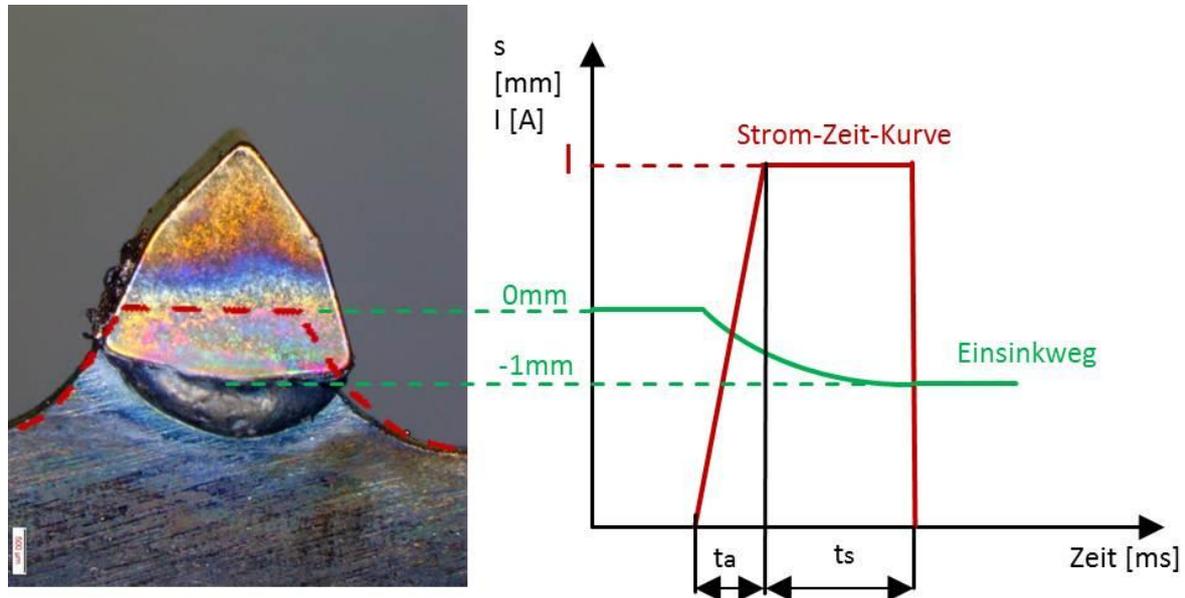


Abbildung 44: Einsinkweg

4.3.2 Ergebnis Schweißparameter

Der Effekt der einzelnen Faktoren auf die Abscherfestigkeit wurde mit Hilfe von Minitab[®] 17 Software ausgewertet. Wie sich dieser Effekt berechnet wird in Kapitel 2.5 beschrieben.

Das Ergebnis der Untersuchung der Haupteffekte ist sehr eindeutig. Je steiler der Anstieg der Geraden, desto größer ist der Effekt des Faktors auf die Abscherkraft.

Aus Abbildung 45 lässt sich schließen, dass sich folgende Eigenschaften positiv auf eine Erhöhung der Abscherkraft auswirken:

- hohe Schweißströme
- langsame Schweißanstiegszeiten
- langsame Schweißzeiten
- niedrige Elektrodenkräfte
- 2-Kontaktsitz besser als 1-Kontaktsitz
- CTS18-D (K20) besser als HC10 (K10)

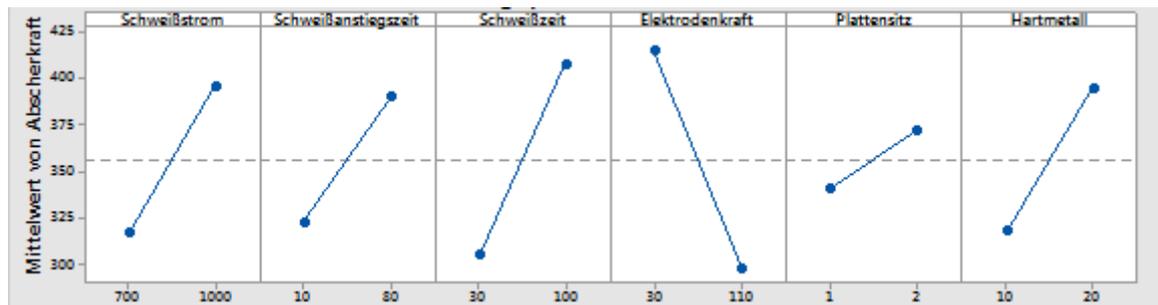


Abbildung 45: Effekt der Hauptfaktoren

Auch das optische Aussehen der Schweißstelle und die Beurteilung der Bruchfläche spiegeln dieses Ergebnis wieder. Nachfolgend ist in Abbildung 46 jeweils ein Beispiel für eine gute und für eine schlechte Schweißung zu sehen.

Hier wurden folgende Parameter verwendet:

- Stammbblattmaterial: 80CrV2
- Hartmetallsorte: HC10
- Plattensitz: 1-Kontaktsitz

Die Schweißparameter lassen sich jeweils in der Grafik unten ablesen.

Abscherfestigkeit = 11MPa



Abscherfestigkeit = 125MPa

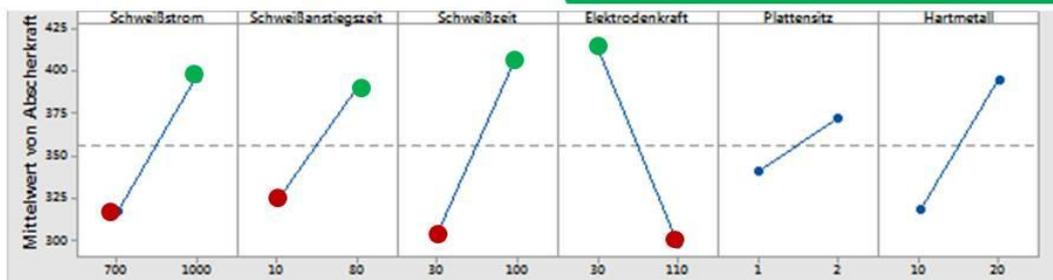
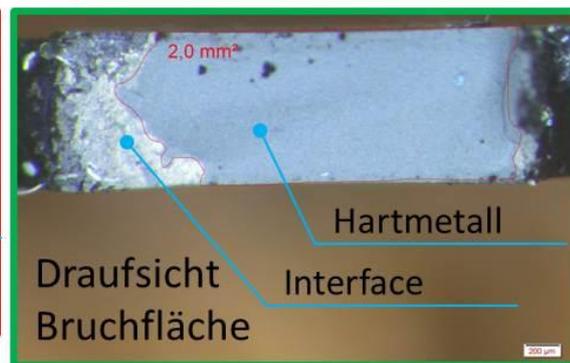
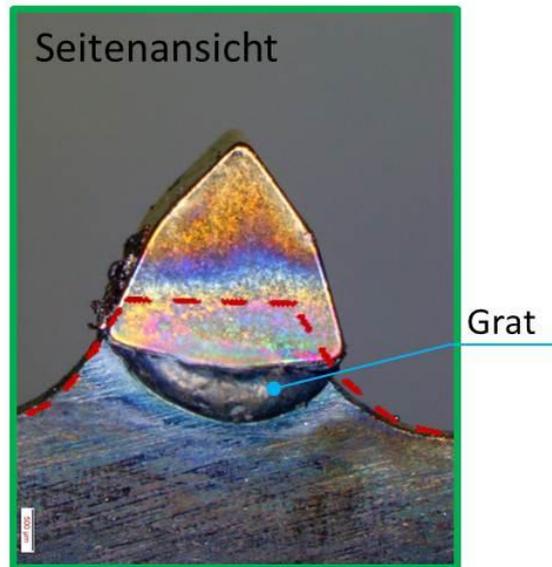


Abbildung 46: Beispiel für eine gute (grün) und eine schlechte (rot) Schweißung

Nach Analyse der beiden Schweißungen in Abbildung 46, bekräftigen die optischen Eindrücke das Ergebnis aus der Messung der Abscherfestigkeit.

Bei der Seitenansicht fällt auf, dass bei der guten Schweißung (grün) der Einsinkweg viel größer und auch der Grat größer ausgeformt ist. Die Anlauffarben am Hartmetallzahn deuten auf eine höhere Temperaturentwicklung hin. Bei der Draufsicht auf die Bruchfläche kann man bei der guten Schweißung erkennen, dass der Großteil

des Bruches durch das Hartmetall verläuft und nur ein kleiner Teil durch das Interface zwischen Hartmetall und Stammbblatt. Im Gegenzug dazu verläuft bei der schlechten Schweißung (rot) der Bruch größtenteils durch das Interface.

Es ist deutlich zu erkennen, dass es einen Zusammenhang zwischen Wärmeeinbringung und Abscherfestigkeit gibt. Eine hohe Wärmeeinbringung führt zu einer hohen Abscherfestigkeit. Das Schmelzbad des Stammbblattes fließt, bei hoher Wärmeentwicklung, um den Hartmetallzahn herum und zeigt eine gute Benetzung mit dessen Nickelschicht.

Der Zusammenhang zwischen Schweißparametern und der Wärmemenge wird deutlich, schreibt man die vereinfachte Form des Joule'schen Gesetzes auf:

$$Q = I^2 * R * t$$

Formel 4: vereinfachtes Joule'sches Gesetz

Eine niedrige Elektrodenkraft F führt zu hohem elektrischen Widerstand R (siehe Kapitel 2.4.3). Zusammen mit der langen Schweißzeit t und dem hohen Schweißstrom I ergibt sich eine hohe Wärmemenge Q .

Bei guten Schweißparametern Abbildung 46 ergibt sich dabei ein Energieaufwand von ca. 150 Joule, bei der schlechten Schweißung hingegen nur 30 Joule.

4.3.3 Ergebnis Plattensitz

Wie in Abbildung 45 abgelesen werden kann, ist der Effekt beim Plattensitz nur sehr gering. Aber es ist abzulesen, dass der 2-Kontaktsitz tendenziell bessere Ergebnisse liefert. Außerdem wurde beobachtet, dass sich durch die Hexagonal-Form des Hartmetallzahnes und der V-Öffnung des Stammbblattes, der Zahn selbst zentriert, bevor der Schweißprozess beginnt. Dadurch wird eine höhere Positioniergenauigkeit erreicht.

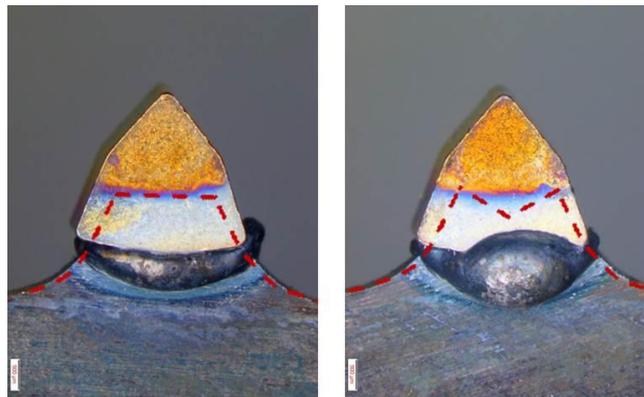


Abbildung 47: Vergleich Plattensitze

4.3.4 Ergebnis Hartmetall

Abbildung 45 zeigt, dass die CTS18-D Hartmetallsorte bessere Ergebnisse liefert als die Sorte HC10. Da aber HC10 der Zielwerkstoff ist, wird diese Hartmetallsorte trotzdem weiter verfolgt, um ein Optimum zu finden.

4.3.5 Ergebnis Elektrodenwerkstoff

In einer zusätzlichen Versuchsreihe wurde der Effekt des Elektrodenwerkstoffes auf die Schweißverbindung untersucht. Dabei wurde ein Parametersatz, der bereits ein gutes Ergebnis (Abbildung 46, gute Schweißverbindung, 80CrV2 + HC10, 1-Kontaktsitz) liefert, mit jedem Elektrodenwerkstoff wiederholt und die Ergebnisse verglichen.

Für diese Versuchsreihe wurden folgende Parameter verwendet:

- Stammbblattmaterial: 80CrV2
- Hartmetallsorte: HC10
- Plattensitz: 1-Kontaktsitz
- Schweißstrom: 1000A
- Schweißanstiegszeit: 80ms
- Schweißzeit: 30ms
- Elektrodenkraft: 30N

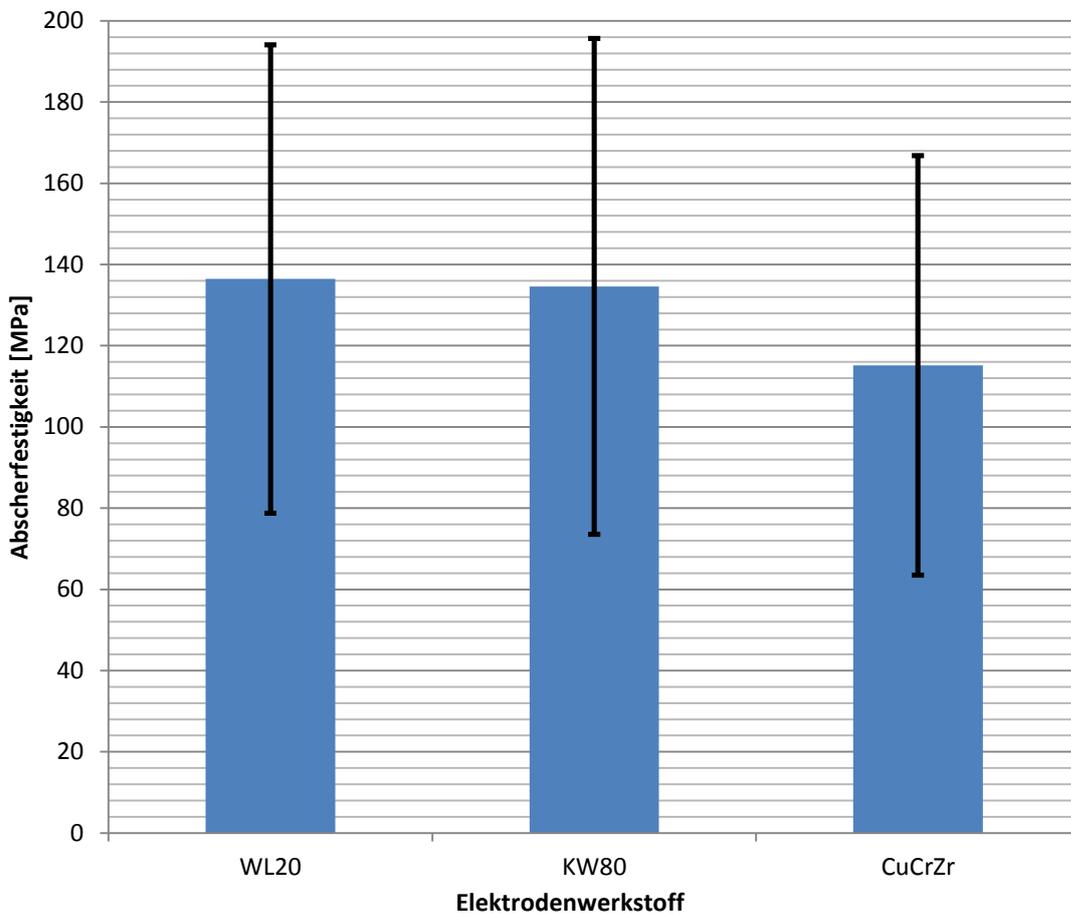


Abbildung 48: Effekt des Elektrodenwerkstoffes auf die Abscherkraft

In Abbildung 48 ist zu erkennen, dass die Elektrodenwerkstoffe **KW80** und **WL20** fast identische Ergebnisse hinsichtlich der Abscherkraft liefern. Einzig der Werkstoff **Cu-CrZr** zeigt ein geringfügig schlechteres Ergebnis.

Diese Erkenntnis ist für den automatisierten Betrieb von großer Bedeutung. Zwischen zwei Schweißversuchen vergehen im Allgemeinen ca. 15 Sekunden. In dieser Zeit kann sich die Schweißelektrode wieder ausreichend abkühlen, bevor die nächste Schweißung startet. Im automatisierten Betrieb kommt es aber zu Taktzeiten von weniger als drei Sekunden. Hier kann sich die Elektrode nicht mehr abkühlen und es kommt zu einer höheren thermischen Belastung. Dabei spielen Haltbarkeit und Stückpreis der Elektrode eine wichtige Rolle. Diese beiden Aspekte müssen dann für den automatisierten Betrieb separat untersucht werden. Vom Standpunkt der Abscherfestigkeit können die beiden Werkstoffe KW80 und WL20 empfohlen werden, da sie gleich gute Ergebnisse liefern.

4.3.6 Ergebnis Oberflächenbeschaffenheit Stamblatt

Der elektrische Übergangswiderstand zweier Bauteile ist beim Widerstandsschweißen für die Temperaturentwicklung von entscheidender Bedeutung (Abbildung 15). Deshalb stellte sich die Frage, welchen Einfluss eine Oberflächenbehandlung des Stamblattes auf das Schweißergebnis hat. Als Oberflächenbehandlung wurde das Sandstrahlen gewählt, da diese in der Kreissägen-Fertigung bereits große Verwendung findet und deshalb gut verfügbar ist.

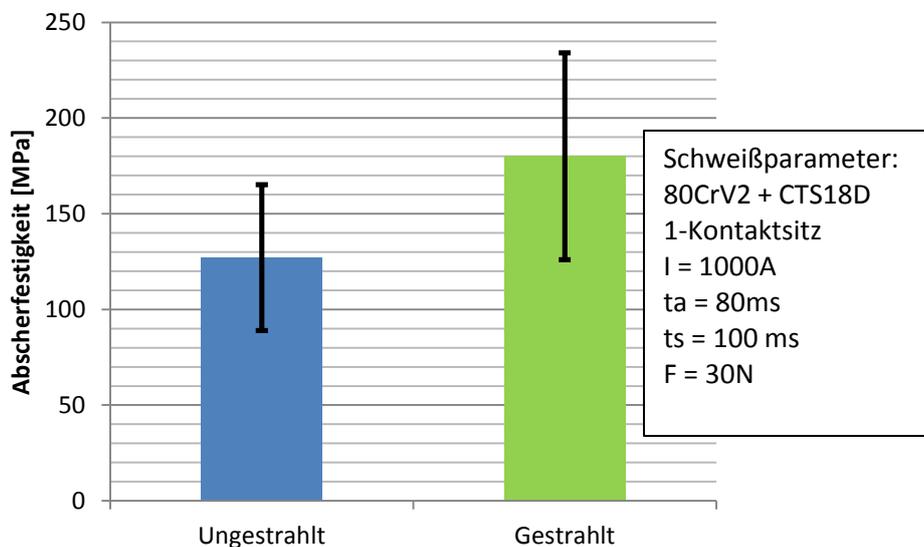


Abbildung 49: Gestrahlte gegen ungestrahlte Kontaktoberfläche

Abbildung 49 zeigt den Vergleich: Gestrahlte gegen ungestrahlte Kontaktoberfläche mit Mittelwert und Standardabweichung. Die verwendeten Parameter sind in der Legende rechts abzulesen.

Die Abscherfestigkeit bei sandgestrahlten Oberflächen ist deutlich höher als jene von ungestrahlten Oberflächen. Oxide, Schmutz und andere Verunreinigungen werden von der Oberfläche entfernt und bereiten die Kontaktzone somit perfekt für den Schweißprozess vor.

Was die Oberflächenrauigkeit der Fügeteile betrifft, ist hier sicher noch Potential für das Steigern der Abscherfestigkeit vorhanden. Es wird empfohlen Messungen der Oberflächenrauigkeit durchzuführen und Stamblätter mit verschiedener Rauigkeit

zu verschweißen um den genauen Effekt der Oberflächenrauigkeit auf die Verbindung zu prüfen.

4.3.7 Schlussfolgerung

Für das weitere Vorgehen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Bei den Schweißparametern werden gute Ergebnisse erzielt, wenn
 - a. der **Schweißstrom** hoch,
 - b. die **Stromanstiegszeit** und die **Schweißzeit** lange
 - c. und die **Elektrodenkraft** niedrig ist.

Es lässt sich dadurch darauf schließen, dass ein hoher Wärmeeintrag zu einer guten Verbindung zwischen Hartmetall und Stammblatt führt. Ziel ist es also bei Parametern mit hoher Wärmeentwicklung ein Optimum zu finden.

- Der 2-Kontaktsitz zeigt eine geringfügig bessere Abscherfestigkeit als 1-Kontaktsitze und liefert eine bessere Positioniergenauigkeit des Hartmetallzahn auf dem Stammblatt. Somit wird nur noch der **2-Kontaktsitz** weiterverfolgt.
- Die Hartmetallsorte CTS18-D hat gegenüber der HC10 – Sorte eine höhere Abscherfestigkeit. Es wurde aber gezeigt, dass schweißen mit **HC10** - Hartmetallzähnen möglich ist, deshalb wird dieser für den weiteren Optimierungsvorgang untersucht, da es Wunschziel ist diesen zu verwenden.
- Die Elektrodenwerkstoffe KW80 und WL20 liefern annähernd gleich gute Ergebnisse. Nur der Werkstoff CuCrZr verhält sich geringfügig schlechter. Für die weiteren Schweißversuche wird die **WL20** – Elektrode verwendet.
- Gestrahlte Stammblätter verhalten sich zur Abscherfestigkeit besser als ungestrahlte. Deshalb werden für die weitere Untersuchung nur **gestrahlte** Stammblätter verwendet

Alle diese Erkenntnisse fließen in die nachfolgenden Untersuchungen ein.

4.4 Vollversuch

Ziel der Vollversuche ist es, ein Maximum für die Abscherfestigkeit zu finden. Es wird ein neues Parameterfenster erstellt. Dieses ist kleiner und es wird nun dorthin gelegt, wo ein Optimum vermutet wird. Abbildung 50 veranschaulicht diesen Prozess noch einmal deutlich.

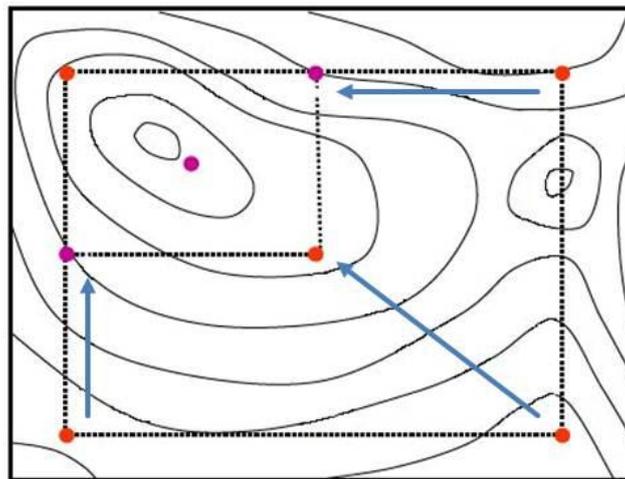


Abbildung 50: Optimierungsprozess [15]

Die Werte des neuen Parameterfensters können in Tabelle 10 abgelesen werden. Hier wurden die Erkenntnisse des Screening - Prozesses angewendet und das Fenster zu höheren Schweißströmen, längeren Stromanstiegszeiten und kleineren Elektrodenkräften verschoben.

Tabelle 10: Faktorstufen Vollversuch

	Parameter	min. - Wert	max. - Wert
Schweißstrom	I [A]	850	1000
Stromanstiegszeit	t_a [ms]	40	80
Elektrodenkraft	F [N]	30	60

Wie man erkennt, wird in dem neuen Fenster keine Schweißzeit berücksichtigt. Dies ist dadurch begründet, dass an Stelle der Schweißzeit der Einsinkweg vorgegeben

ist. Wir wechseln also von einer Zeitschaltung zu einer Wegschaltung. Das Schweißgerät schaltet automatisch, nach Erreichen des vorher definierten Einsinkweges, ab. Für die spätere praktische Anwendung ist es wichtig, dass der Hartmetallzahn auf einer definierten Position ist, deshalb wird ein **Einsinkweg** von **1mm** definiert. Dieser Wert hat bereits bei den Screening-Versuchen gute Ergebnisse erzielt. Abbildung 51 zeigt, wie sich der Einsinkweg über die Strom-Zeit-Kurve verhält. Wenn 1mm Einsinkweg erreicht wird, wird der Schweißstrom sofort abgeschaltet.

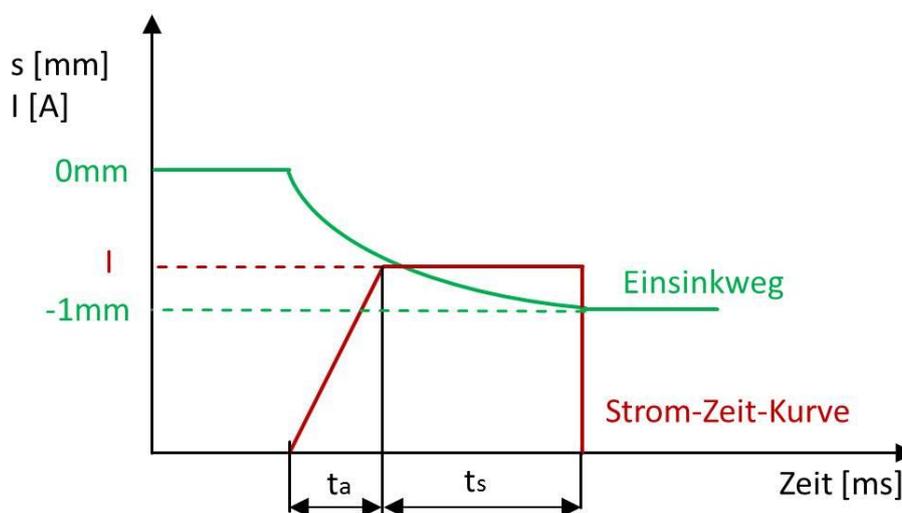


Abbildung 51: Einsinkweg und Strom-Zeit-Kurve

Folgende Parameter wurden für diese Versuchsreihe fixiert:

- Als Elektrodenwerkstoff wird **WL20** verwendet.
- Für den Hartmetallzahn wird die Sorte **HC10** verwendet.
- Es werden nur Stammbblätter mit **2-Kontaktsitz** verwendet.
- Das Schweißgerät senkt den **Schweißstrom** nach Erreichen des **Einsinkweges** von **1mm** sofort auf **0A**.
- Es werden nur **gestrahlte** Stammbblätter verwendet.

Für die Untersuchung wurde ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan eingesetzt, da dieser Nichtlinearitäten im System gut auflösen kann (siehe Kapitel 2.2.2). Das Versuchsfenster wird als Würfel dargestellt, wobei jede Raumachse einem Faktor entspricht. Der zentral zusammengesetzte Versuchsplan besteht aus einem Würfel (blau), einem Stern (grün) und einem Zentralpunkt (rot).

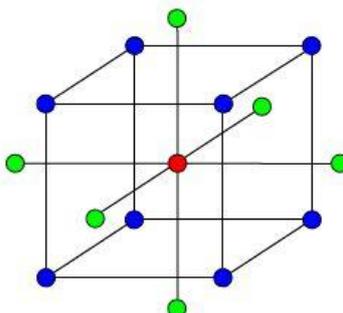


Abbildung 52: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan [15]

Tabelle 11: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan mit Werten

Nr.	Schweißstrom I [A]	Stromanstieg ta [ms]	Elektrodenkraft F [N]
1	850	40	30
2	1000	80	30
3	1000	40	60
4	850	80	60
5	925	60	45
6	925	60	45
7	1000	40	30
8	850	80	30
9	850	40	60
10	1000	80	60
11	925	60	45
12	925	60	45
13	800	60	45
14	1050	60	45
15	925	27	45
16	925	93	45
17	925	60	20
18	925	60	70
19	925	60	45
20	925	60	45

Tabelle 11 zeigt den verwendeten zentral zusammengesetzten Versuchsplan. Jeder Parametersatz dieses Versuchsplans wird zehnmal wiederholt. Außerdem sieht man, dass der Zentralpunkt (rot) in einem Versuchsplan insgesamt sechsmal vorkommt.

Damit kann auch eine bessere Aussage über die Streuung der Ergebnisse gemacht werden.

4.4.1 Ergebnis

Leider konnte mit dieser Versuchsreihe das Ziel von 200MPa Abscherfestigkeit nicht erreicht werden (siehe Abbildung 53). Außerdem fällt auf, wie auch bei den Versuchen zuvor, dass eine sehr hohe Streuung, auftritt. Es handelt sich dabei um eine **Standardabweichung von 25% des Absolutwertes**. In Anbetracht dieser hohen Streuung ist keine eindeutige Aussage über ein Maximum möglich.

Vollversuche 80CrV2 + HC10

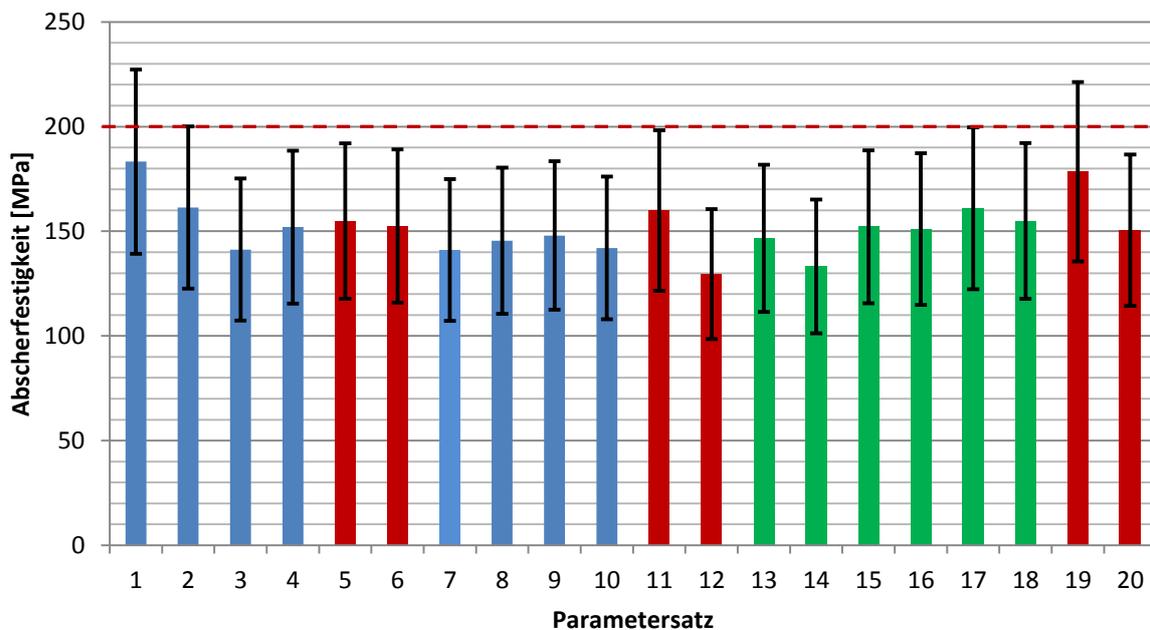


Abbildung 53: Ergebnis der Abscherprüfung mit Standardabweichung für Materialkombination 80CrV2 + HC10

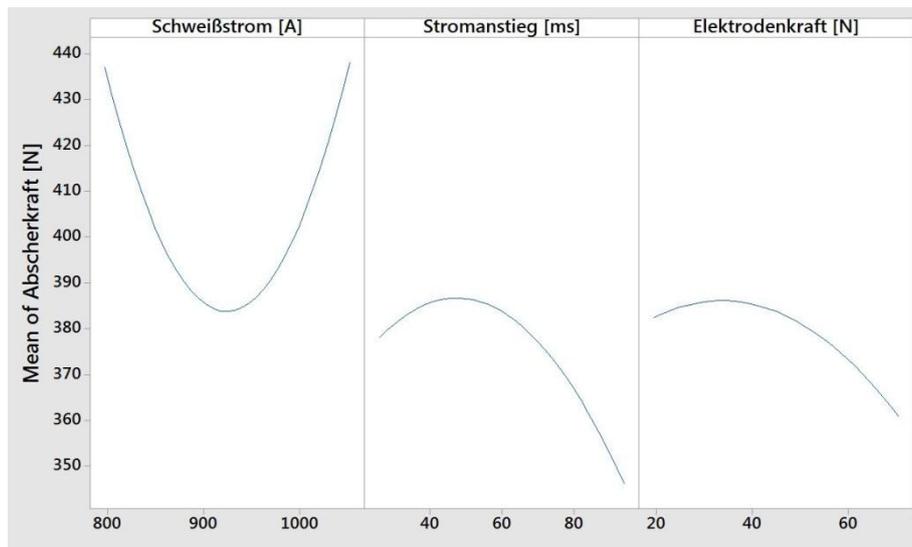


Abbildung 54: Effekt der Faktoren auf Abscherkraft.

Auch die Untersuchung der Bruchbilder spiegelt das Ergebnis der Abscherprüfung wieder. Die Bruchflächen unterscheiden sich untereinander nur geringfügig. Alle haben aber folgende Gemeinsamkeit: Die Bruchlinie geht entweder vollständig durch den Hartmetallzahn oder mindestens zu 75% durch den Hartmetallzahn und der restliche Bruchverlauf geht durch das Interface zwischen Hartmetall und Stammblatt. Abbildung 55 zeigt zwei typische Bruchflächen.

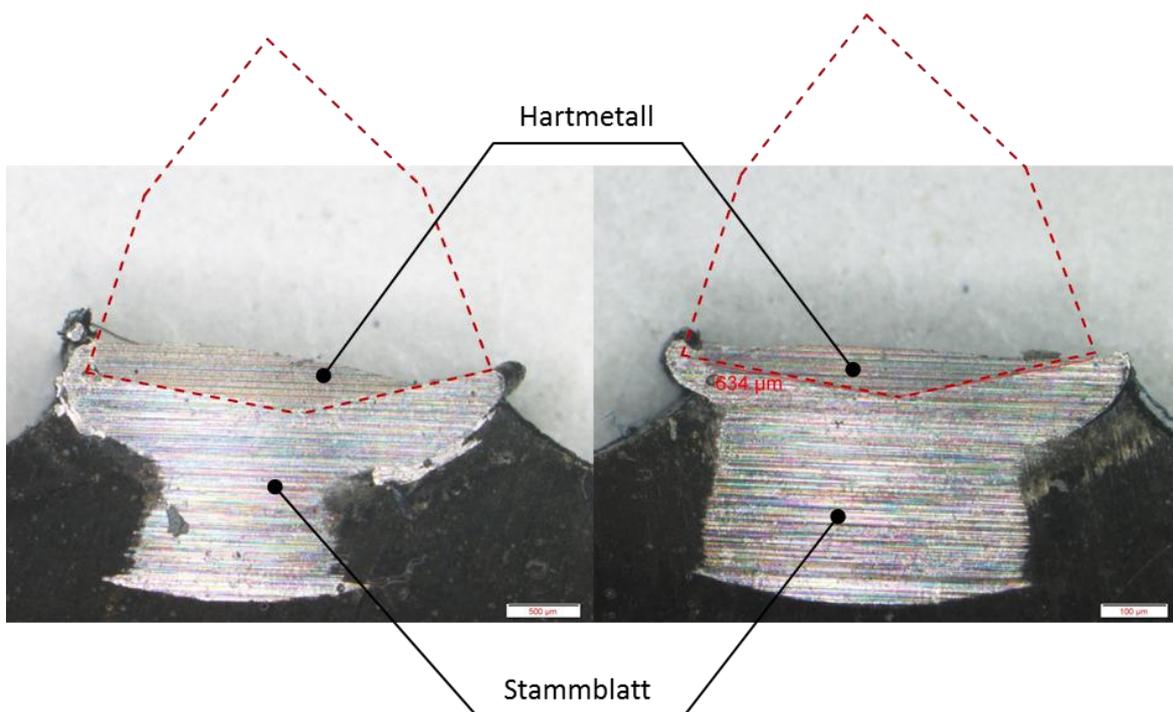


Abbildung 55: Bruchflächen bei der Vollversuchsreihe

4.4.2 Schlussfolgerung

Das Ziel von 200MPa Abscherfestigkeit wurde nicht erreicht. Auch zeigen die Ergebnisse eine hohe Streuung. Allerdings können Festigkeiten von über 150 MPa sicher erreicht werden. Positiv zu bewerten ist auch, dass der Bruch durch das Hartmetall verläuft und nicht, wie erwartet, durch das Interface zwischen Hartmetall und Stammbblatt. Dass bei den meisten Brüchen der Bruchverlauf zu 75% durch das Hartmetall geht und zu 25% durch das Interface wird so gedeutet, dass dort, wo das Interface bricht keine ausreichende Benetzung von Stammbblatt und Hartmetall stattfindet.

Wenn also die Benetzung verbessert wird, das heißt, der Bruch geht fast ausschließlich durch das Hartmetall, so müsste auch die Abscherfestigkeit verbessert werden können. Um dies zu erreichen soll die Wärmemenge weiter erhöht werden, um das volle Potential der Schweißverbindung zu erreichen. Dies führt zur Idee des Schweißens mit langer Temperaturführung.

4.5 Schweißen mit langer Temperaturführung

Beim Widerstandsschweißen ergibt sich die Wärmemenge aus dem Produkt von Schweißstrom I , Widerstand R und Zeit t :

$$Q = I^2 * R * t$$

Der Strom I kann nicht mehr weiter erhöht werden, da sonst die Spritzergrenze überschritten wird. Auch der Übergangswiderstand R , welcher mit der Elektrodenkraft gesteuert wird, kann nicht weiter erhöht werden, da das gleiche Phänomen auftritt und es zu Spritzern und einer übermäßigen thermischen Belastung der Elektrode kommt. Bleibt also nur mehr die Schweißzeit t als Stellhebel. Um die Schweißzeit t zu verlängern muss aber der Schweißstrom I verkleinert werden, da sonst der Einsinkweg von 1mm zu früh erreicht wird und so keine lange Schweißzeit erzielt werden kann. Abbildung 56 zeigt einen Vergleich zwischen einer Stromkurve, wie sie bei den Vollversuchen verwendet wurde, und der neuen Stromkurve, mit welcher eine höhere Wärmemenge erzielt werden soll.

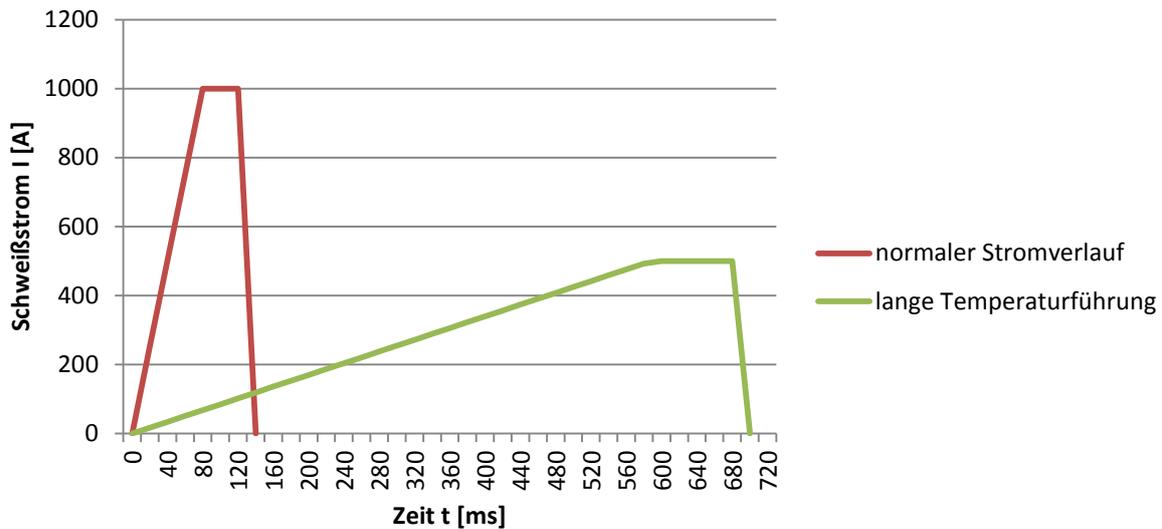


Abbildung 56: Vergleich zwischen normaler und langer Stromkurve

Man erkennt, dass ein sehr großer Unterschied zwischen den beiden Stromkurven besteht. Die verwendete Schweißsoftware [19] liefert den gemessenen Strom und die Spannung und berechnet daraus die für den Schweißprozess benötigte elektrische Energie. Bei früheren Schweißversuchen mit normalem Stromverlauf (rote Kurve) ergibt sich dabei ein Energieaufwand von 150 Joule. Bei den neuen Schweißversuchen mit langer Schweißzeit (grüne Kurve) wurden 250 Joule gemessen. Das bedeutet ein Plus von 66% an elektrischer Arbeit. Mit dieser elektrischen Arbeit wird beim Widerstandsschweißen Wärmeenergie erzeugt, somit steigt auch die entstehende Wärmemenge um denselben Anteil.

Während des Schweißprozesses kann man an den Glühfarben erkennen, dass die Temperaturen höher sind und, der gesamte Hartmetallzahn gleichmäßig erwärmt wird.

Um den Prozess zu überwachen, wird eine laufende Temperaturmessung während des Fügeprozesses empfohlen. Änderungen im Schweißprozess spiegeln sich in einer Änderung des Temperaturverlaufes wieder. Beim Lötprozess ist es bereits üblich, während des Fügens die Temperatur aufzuzeichnen. Aus Zeitgründen war es für diese Arbeit leider nicht mehr möglich eine Temperaturmessung durchzuführen.

4.5.1 Ergebnis

Bei der Betrachtung der Schweißstelle fällt auf, dass bei der Schweißung mit langer Schweißzeit (grün) das aufgeschmolzene Schmelzbad das Hartmetall gleichmäßig benetzt. Dies kann bei der Schweißung mit normaler Schweißkurve (rot) nicht beobachtet werden. Das Schmelzbad benetzt das Hartmetall oft nur einseitig. Bei den Bruchflächen ist die unbenetzte Seite auch diejenige, wo der Bruch durch das Interface statt durch das Hartmetall verläuft. Die optische Bewertung der Schweißung mit langer Schweißzeit ist also positiv.

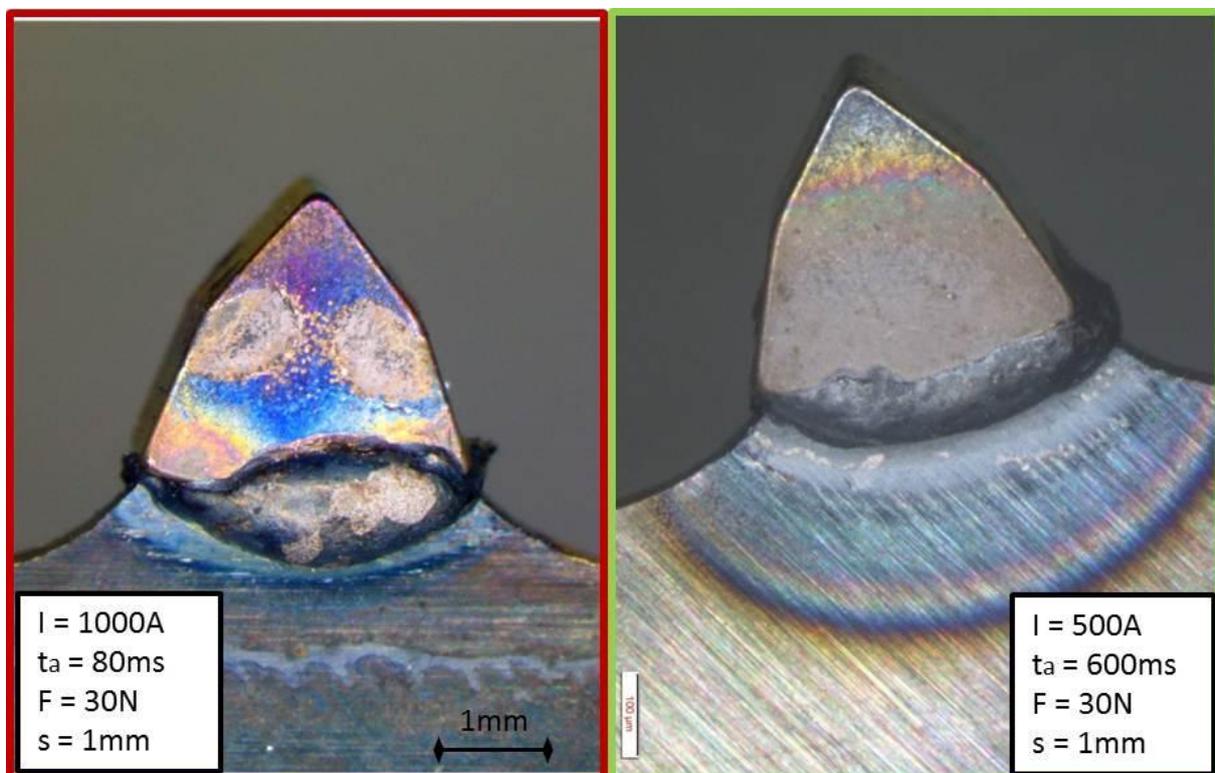


Abbildung 57: Schweißung mit langer Schweißzeit (grün) und mit normaler Schweißkurve (rot) (80CrV2 + HC10, 2-Kontaktsitz)

Es wurden unterschiedlich lange Schweißzeiten getestet um auch bei dieser Versuchsreihe ein Optimum zu finden.

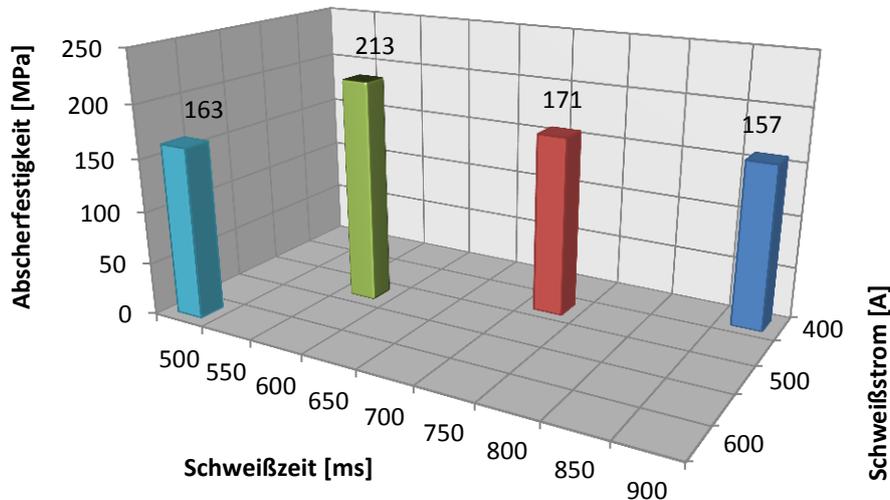


Abbildung 58: Ergebnis verschieden langer Stromkurven (80CrV2 + HC10, 2-Kontaktsitz)

Je länger die Schweißzeit gewählt wurde, desto niedriger musste der Schweißstrom sein, da sonst zu viel Temperatur entsteht und der Einsinkweg von 1mm zu früh erreicht wird. Es zeigt sich ein Optimum bei einem Schweißstrom $I = 500\text{A}$ und einer Schweißzeit $t = 600\text{ ms}$. Die Abscherfestigkeit von 213 MPa ist ein Mittelwert aus 18 Schweißversuchen und die Standardabweichung liegt bei 25% des Absolutwertes. Die Standardabweichung ist nach wie vor sehr hoch. Bei den gelöteten Verbindungen liegt diese bei nur 10% des Absolutwertes. Aber die Abscherfestigkeit von 213 MPa liegt über dem Zielwert von 200 MPa und ist somit mit der Festigkeit von Löt-Verbindungen vergleichbar.

4.6 Bestätigungsversuch

Die Idee mit den langen Schweißzeiten führen zu einem Erfolg. Ein Parametersatz ($I = 500\text{A}$, $t = 600\text{ms}$) sticht besonders heraus, weil er den Zielwert von 200 MPa Abscherfestigkeit übersteigt. Dieser Parametersatz soll nun über eine größere Versuchsreihe untersucht werden, um die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses zu testen. Die Reproduzierbarkeit ist ein wichtiger Faktor, falls dieser Prozess später einmal in der Serienfertigung eingesetzt werden soll.

Für den Bestätigungsversuch wurden folgende Parameter verwendet:

- Stammbblattqualität: 80CrV2 und 75Cr1
- Hartmetallsorte: HC10

- Kontaktgeometrie: 2-Kontaktsitz
- Elektrodenwerkstoff: WL20
- Schweißstrom I: 500A
- Stromanstiegszeit t_a : 600ms
- Elektrodenkraft F: 30N
- Einsinkweg s: 1mm

4.6.1 Ergebnis Bestätigungsversuch

Um die hohe Streuung der Ergebnisse besser zu zeigen, wurde eine Darstellung gewählt, die die Verteilung der Abscherfestigkeit und ihre Häufigkeit zeigt (Abbildung 59 für 80CrV2 und Abbildung 60 für 75CrV1). Man erkennt, dass bei beiden Materialkombinationen die Versagenhäufigkeit bei einer Abscherfestigkeit von 200 MPa am größten ist. Allerdings reichen die Werte von unter 100 MPa bis über 400 MPa, was einem sehr breiten Streuungsband entspricht. Dass sich die beiden Zielstamtblattwerkstoffe sehr ähnlich verhalten war zu erwarten, da auch die chemische Analyse dieser beiden Stahlsorten sehr ähnlich ist (Tabelle 4). Da diese Versuchsreihe aufgrund der hohen Anzahl an benötigten Schweißungen sehr aufwendig ist, wurde diese Untersuchung nur auf die beiden Zielwerkstoffe 80CrV2 und 75Cr1 durchgeführt.

Auf die hohe Streuung und deren Ursachen wird im Kapitel 4.9.2 Streuung der Ergebnisse genauer eingegangen.

Aufgrund der hohen Streuung der Festigkeitsdaten ist eine Charakterisierung durch den einfachen Mittelwert nicht sinnvoll. Da die Verteilung unsymmetrisch ist, eignet sich auch keine Gauß'sche Normalverteilung, so dass die Weibullverteilung zur Anwendung kommt. [20]

Die zweiparametrische Weibullverteilung beschreibt die Bruchwahrscheinlichkeit $F(\sigma)$, mit der eine Probe bei einer Spannung kleiner gleich σ bricht. Es gilt:

$$F(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m_0} \right]$$

Formel 5: Versagenswahrscheinlichkeit nach Weibull

m_0 und σ_0 sind die zwei Parameter der Weibullverteilung. σ_0 ist die mittlere Inertfestigkeit und bezeichnet diejenige Spannung, bei der 63,2 % aller Proben brechen. Das Weibull-Modul m_0 ist ein Maß für die Streubreite einer Datenreihe. Ein großer Wert für den Parameter m_0 bedeutet eine geringe Streubreite der Verteilung und umgekehrt. Für den Extremfall $m_0 \rightarrow \infty$ würden alle Proben bei exakt gleicher Spannung brechen. [20]

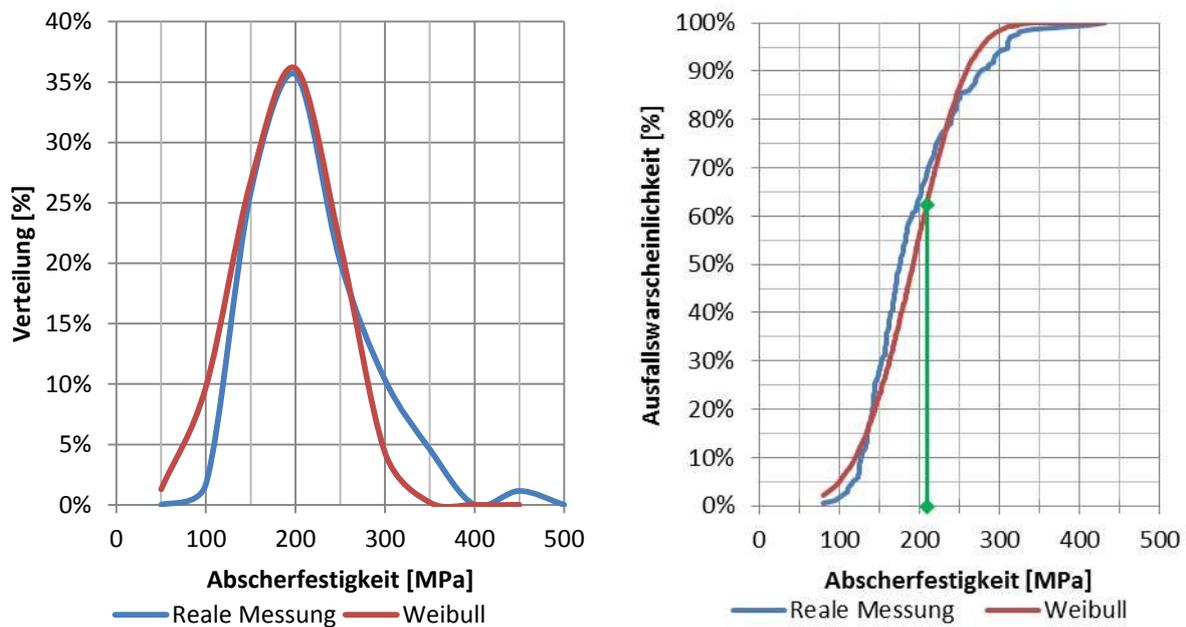


Abbildung 59: Verteilung der Abscherfestigkeit (links) und Ausfallswahrscheinlichkeit (rechts) nach 180 geprüften Schweißverbindungen (80CrV2 + HC10); Weibullparameter: $m_0 = 4$, $\sigma_0 = 210$;

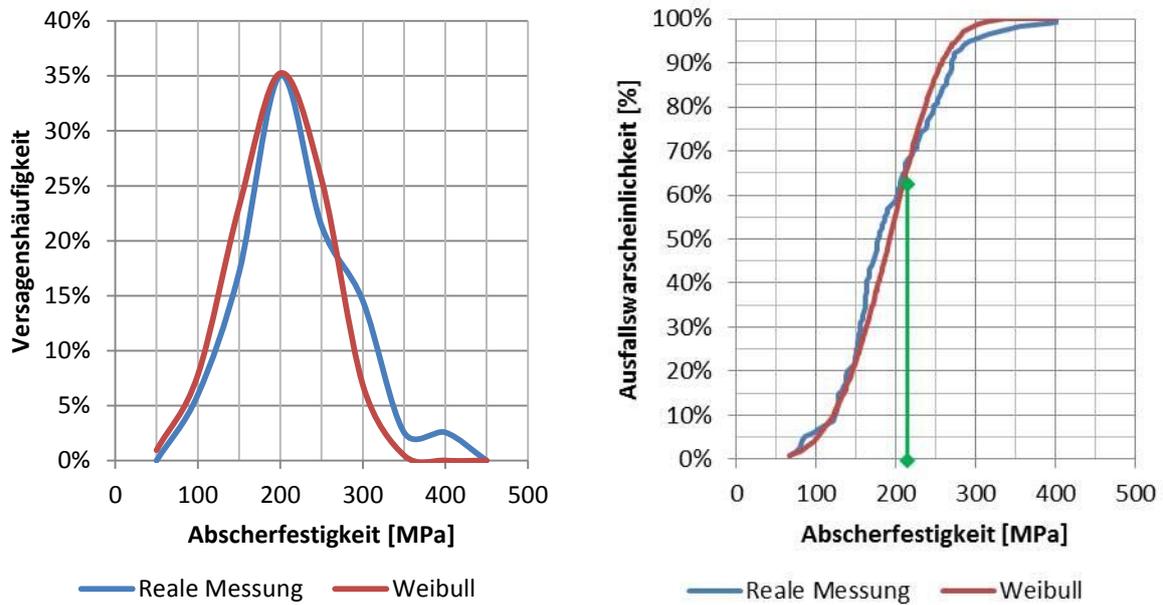


Abbildung 60 Verteilung der Abscherfestigkeit (links) und Ausfallswahrscheinlichkeit (rechts) nach 120 geprüften Schweißverbindungen (75Cr1 + HC10); Weibullparameter: $m_0 = 4,1$, $\sigma_0 = 220$;

Abbildung 61 zeigt die erreichten Bestwerte für jede Stamblattqualität. Alle Bestwerte wurden in Kombination mit der HC10 – Hartmetallsorte erreicht, außer bei dem Bandsägenmaterial 27MnCrB5-2. Hier wurde der Bestwert mit der weicheren Hartmetallsorte CTS18-D erzielt. Da ein HC10 – Hartmetallzahn auch Zielwerkstoff war, wurde hier die Priorität bei den Untersuchungen gelegt. Erwähnenswert ist auch, dass bei all diesen Materialkombinationen das Optimum bei den gleichen Schweißparametern lag. Es wurde also mit langen Schweißzeiten ($t = 600\text{ms}$) und niedrigen Schweißströmen ($I = 500\text{A}$) gearbeitet.

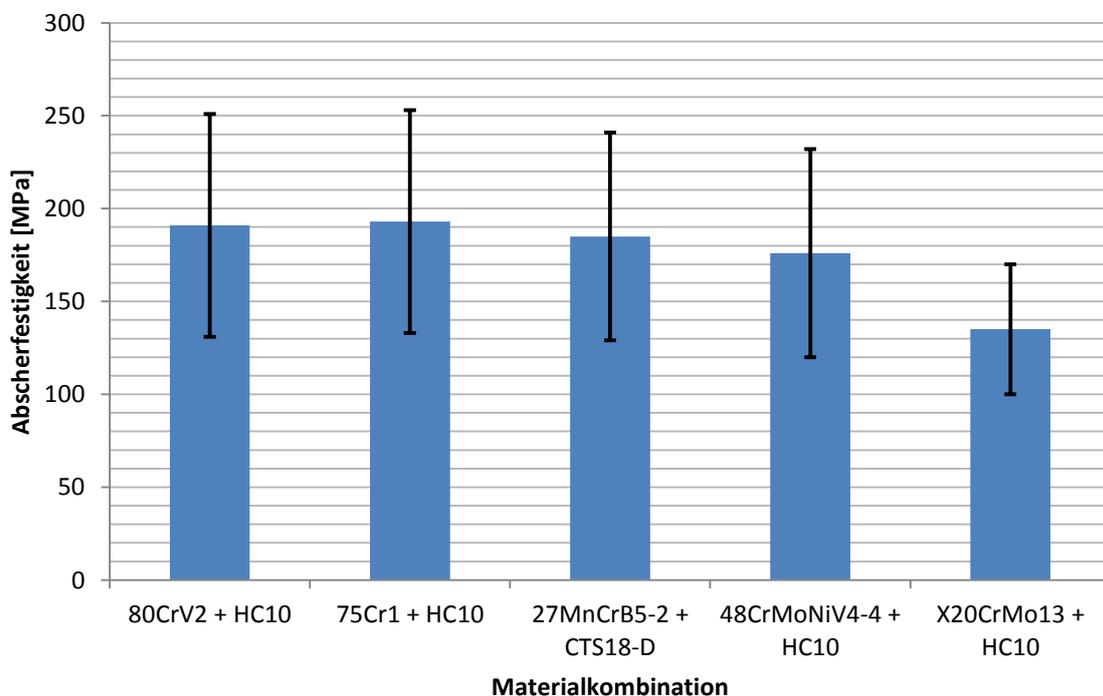


Abbildung 61: Erreichte Bestwerte für alle Stamblattqualitäten

4.6.2 Ergebnis Vergleich Abschervorrichtung

Die Abscherprüfung wird manuell mit einer Handhebelpresse durchgeführt (beschrieben im Kapitel 3.3.4). Durch die manuelle Betätigung des Abscherstempels über einen Hebel, variiert auch die Prüfgeschwindigkeit dieses Stempels. Um dies zu überprüfen, sollen Referenztests bei einer vollautomatischen Zugprüfmaschine durchgeführt werden. So wird auch überprüft, ob die Kraftmessung genau genug ist oder Messfehler aufweist. Diese Abscherprüfungen wurden bei der Firma Böhlerit GmbH mit einer **Zwick Tischprüfmaschine Z020** durchgeführt. Böhlerit besitzt eine eigene,

baugleiche Abschervorrichtung. Somit kann zum einen ein Vergleich zwischen den beiden Abschervorrichtungen und zum anderen zwischen Handhebelpresse und der Tischprüfmaschine gezogen werden.

Folgende Messungen wurden durchgeführt:

- Böhlerit Abschervorrichtung + Tischprüfmaschine Z020
- Leitz Abschervorrichtung + Tischprüfmaschine Z020

Als Referenz wurden die eigenen Messungen mit der Leitz Abschervorrichtung und der Handhebelpresse herangezogen.

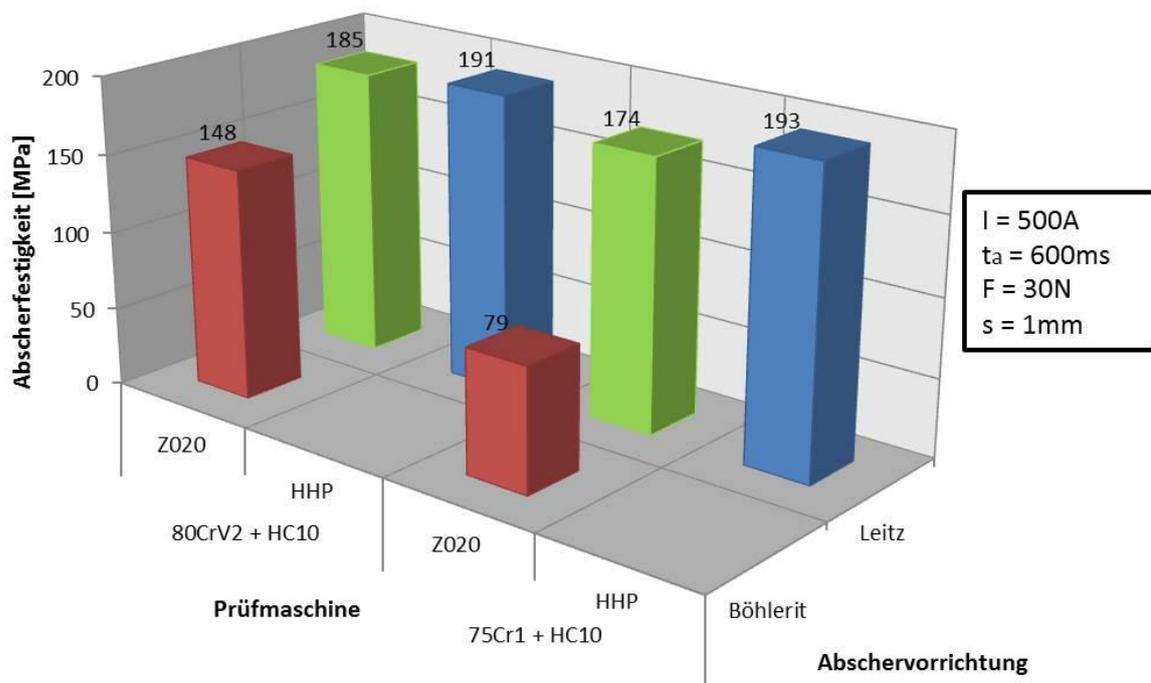


Abbildung 62: Vergleich verschiedener Abscherprüfvorrichtungen (Z020...Tischprüfmaschine, HHP...Handhebelpresse)

Abbildung 62 zeigt einen Vergleich der oben genannten Prüfmittel. Man erkennt, dass der Unterschied zwischen den beiden verwendeten Abschervorrichtungen sehr hoch ist, obwohl diese baugleich sind. Die Vorrichtung von Böhlerit hat grobe Spuren von Verschleiß aufgewiesen. Insbesondere der Abscherstempel hatte keine scharfen Kanten mehr, sondern war abgerundet und kleine Stücke waren herausgebrochen. Dadurch kann nicht sichergestellt werden, dass der Stempel einwandfrei abschert. Somit lassen sich die schlechteren Ergebnisse mit der Böhler – Vorrichtung erklären.

Vergleicht man die Tischprüfmaschine Z020 mit der Handhebelpresse (beide Messungen wurden mit der Leitz – Vorrichtung gemacht), so ergibt sich ein nur geringfügiger Unterschied. Die Messungen sind also vergleichbar. Somit können systematische Fehler durch Verwendung der Handhebelpresse ausgeschlossen werden.

4.7 Charakterisierung der Verbindung

4.7.1 Metallographische Untersuchung

Da immer das Hartmetall bricht, ist dieser Bereich für die metallographische Untersuchung von besonderer Bedeutung. Es liegt der Verdacht nahe, dass es durch die hohen Temperaturen zu einer Überhitzung des Hartmetalls kommt und so Poren und Risse entstehen. [1] hat sich bereits mit der Porenbildung durch Überhitzung des Hartmetalls beschäftigt. Allerdings wurden hier längere Versuchszeiten (bis zu 10 Sekunden) verwendet und dann Poren festgestellt. Bei unseren Versuchen wird eine maximale Versuchszeit von einer Sekunde erreicht.

Im Folgenden werden Bilder und Untersuchungen der Verbindung mit dem besten Ergebnis gezeigt.

In Abbildung 63 ist zu sehen, dass das Hartmetall keinerlei Beschädigung aufweist, also keine Poren und auch keine Risse. Allerdings sieht man auch, dass es am Übergang zwischen Hartmetall und Stahl zu Mischungen kommt. Diese Mischungen sind Einträge von Hartmetall und Nickel in den Stahlkörper. Der Nickel geht dabei in nickelhaltige Phasen über.

Bei der Probenpräparation ist es wichtig, dass die Schweißprobe plan in der Einbettform aufliegt. Durch die hohen Kräfte beim Warmeinbetten kann es sonst zu Rissen oder sogar zum vorzeitigen Bruch im Hartmetall kommen. Somit können nur plangeschliffene Proben für die Probenpräparation verwendet werden (siehe Abbildung 33).

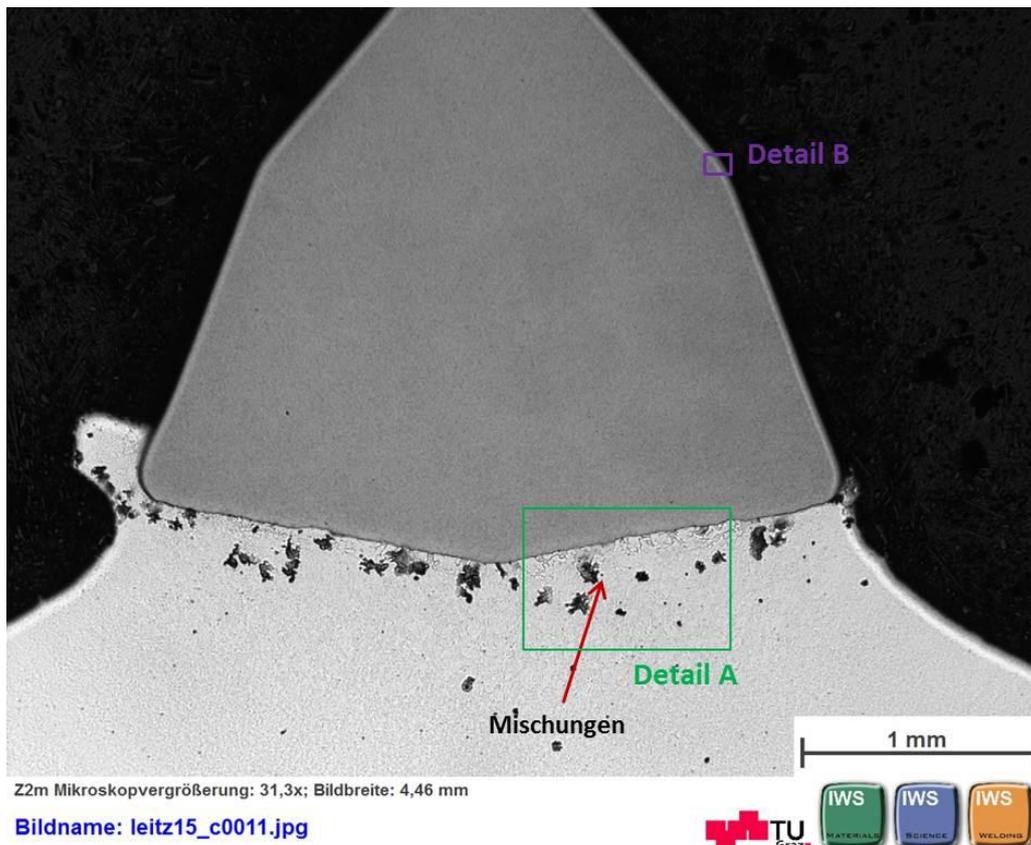


Abbildung 63: Ungeätztes Schlibbild (80CrV2 + HC10)

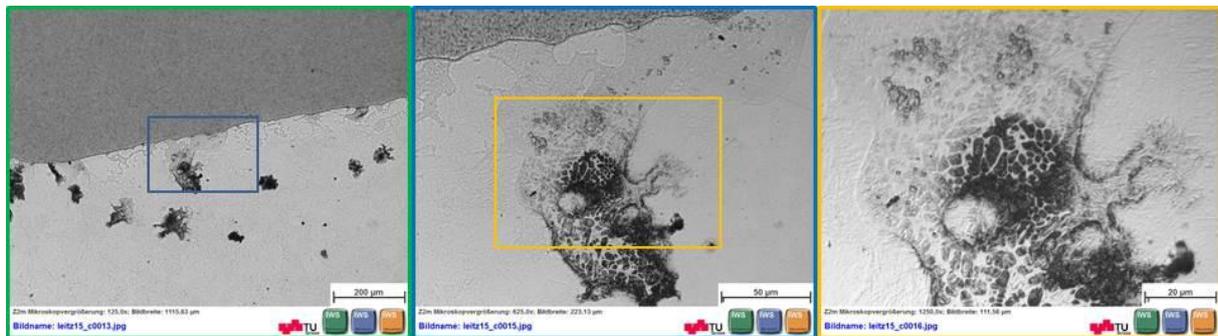


Abbildung 64: Detail A in Vergrößerung (ungeätzt)



Abbildung 65: Mischungen in Vergrößerung (geätzt)

Links: Ätzung mit Murakami

Rechts: Ätzung mit Murakami + Nital

Folgende Ätzmittel wurden für die metallographische Untersuchung verwendet [21]:

- Murakami (für Hartmetall):
 - 100ml destilliertes Wasser
 - 10g Kaliumhydroxid
 - 10g Kaliumferricyanid
 - Ätzzeit: 1min
- Nital (für Stahl):
 - 3% Salpetersäure
 - 97% Ethanol
 - Ätzzeit: 5 sek

Schon im ungeätzten Zustand erkennt man, dass es zu Mischungen von Hartmetall in den Stahlträger kommt. Ätzt man diese Verbindung mit Murakami, welches die Wolframcarbide angreift, so sieht man, dass es sich um einen Hartmetalleintrag handelt. Verwendet man zusätzlich Nital zur Ätzung, so erkennt man, dass im Bereich der Hartmetalleinträge auch nickelhaltige Phasen anwesend sind und die Nickelschicht am Interface gänzlich verschwunden ist.

Außerhalb der Schweißzone ist die Nickelschicht unbeeinflusst und weist eine Dicke von 4-5 µm auf.



Abbildung 66: Detail B: Nickelschicht am Hartmetallzahn außerhalb des Interfaces

4.7.1.1 Zusammenfassung

Durch den Schweißprozess kommt es zu keiner Schädigung des Hartmetalls. Nur am Übergang zwischen Hartmetallzahn und Stahlträger kommt es zu Ausbrüchen. Nach einer Ätzung erkennt man, dass es sich um Wolframcarbide handelt, das sich vom Hartmetallzahn losgelöst hat. Im Interface löst sich die Nickelschicht auf und bildet neue nickelhaltige Phasen im Bereich der Wolframcarbide im Stahltragkörper.

4.7.2 Ergebnisse Härtemessung

Bei der Untersuchung der Härte zeigt sich im Hartmetall kein Unterschied zwischen dem Rohzahn, dem Zustand vor der Wärmebehandlung und dem Zustand nach der Wärmebehandlung. Dies untermauert die Erkenntnisse aus der metallographischen Untersuchung, dass es zu keiner Schädigung des Hartmetallzahnes kommt. Im Stahl kommt es nach dem Schweißen, ohne Wärmebehandlung, wie erwartet zu einer Härtespitze. Diese liegt ungefähr 1mm von der Schweißstelle entfernt. Durch den hohen Kohlenstoffgehalt des Stammblasses und der hohen Abkühlrate nach der Schweißung kommt es dort zur Martensitbildung, die diese Härtespitze verursacht. Mit der Wärmebehandlung wird dieser Martensit angelassen und diese Härtespitze wird abgebaut.

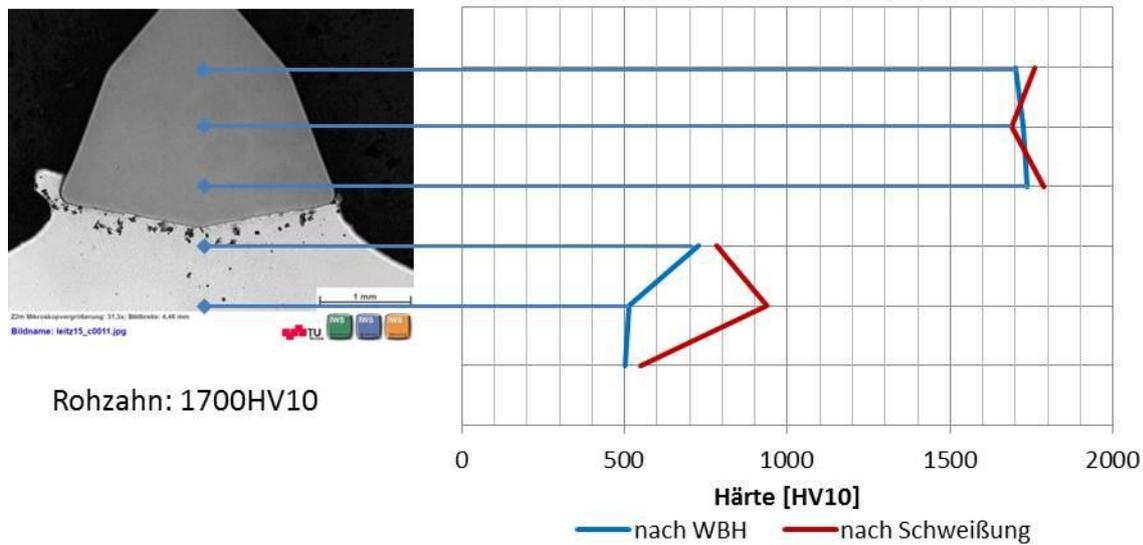


Abbildung 67: Härtemessung der geschweißten Verbindung (80CrV2 + HC10) vor und nach der Wärmebehandlung

4.8 Weitere Erkenntnisse aus den Versuchen

Neben den gewonnenen Erkenntnissen, welche direkten Einfluss auf die Abscherfestigkeit der Schweißverbindung haben, sind noch weitere Erkenntnisse gewonnen worden, die hier angeführt werden.

4.8.1 Einfluss der Wärmebehandlung

Ein einer gesonderten Versuchsreihe wurde der Einfluss der Wärmebehandlung auf die Abscherfestigkeit untersucht. Auf die Standard-Wärmebehandlung wird bereits in Kapitel 3.3.2 eingegangen. In diesem Punkt soll betrachtet werden, ob sich eine kürzere Wärmebehandlungszeit positiv auf die Schweißverbindung auswirkt.

Folgende Wärmebehandlungen wurden gegenübergestellt:

Tabelle 12: Wärmebehandlungen

WBH	Haltetemperatur	Aufheizzeit	Haltezeit	Abkühlzeit
Ofen lang	450°C	8 h	8 h	8 h
Ofen kurz	450°C	30 min	30 min	30 min
Induktion	ca. 750°C	ca. 3 s	5 s	ca. 3 s

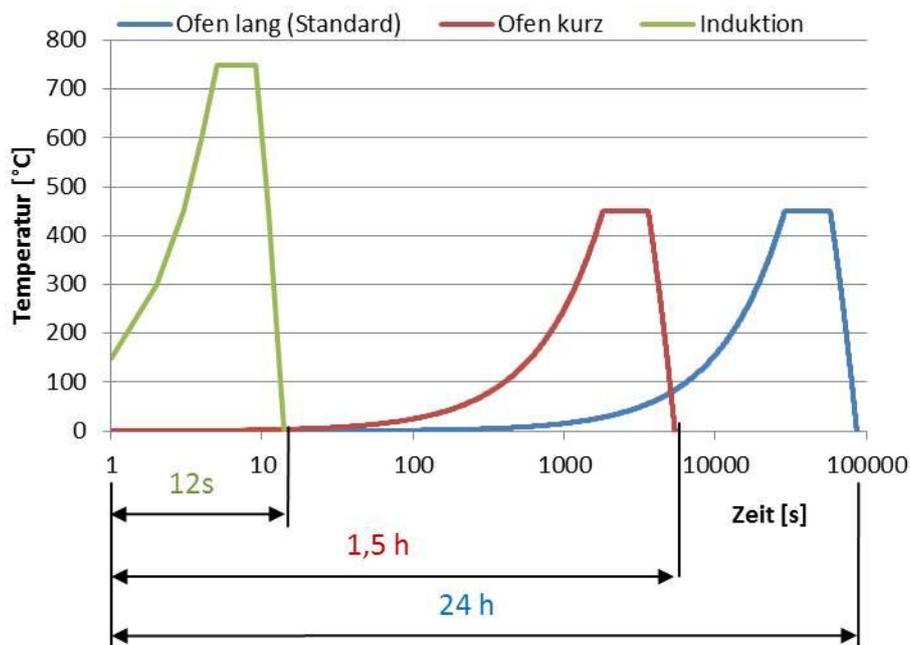


Abbildung 68: Die drei Wärmebehandlungen

Die beiden Wärmebehandlungsarten „Ofen lang“ und „Ofen kurz“ wurden in Kammeröfen durchgeführt. Somit wurde hier immer das gesamte Sägeblatt wärmebehandelt. Beim Induktionsprozess (grün) wurde, mit einer Induktionsspule, lokal der Sägezahn und die nähere Umgebung erwärmt, kurz gehalten und anschließend an der Luft abgekühlt.

4.8.1.1 Ergebnis Wärmebehandlung

Man erkennt aus Abbildung 69, dass ein nur geringer Einfluss der Wärmebehandlung auf die Abscherfestigkeit herrscht. In Hinblick auf die viel größere Standardabweichung kann dieser Einfluss vorerst vernachlässigt werden.

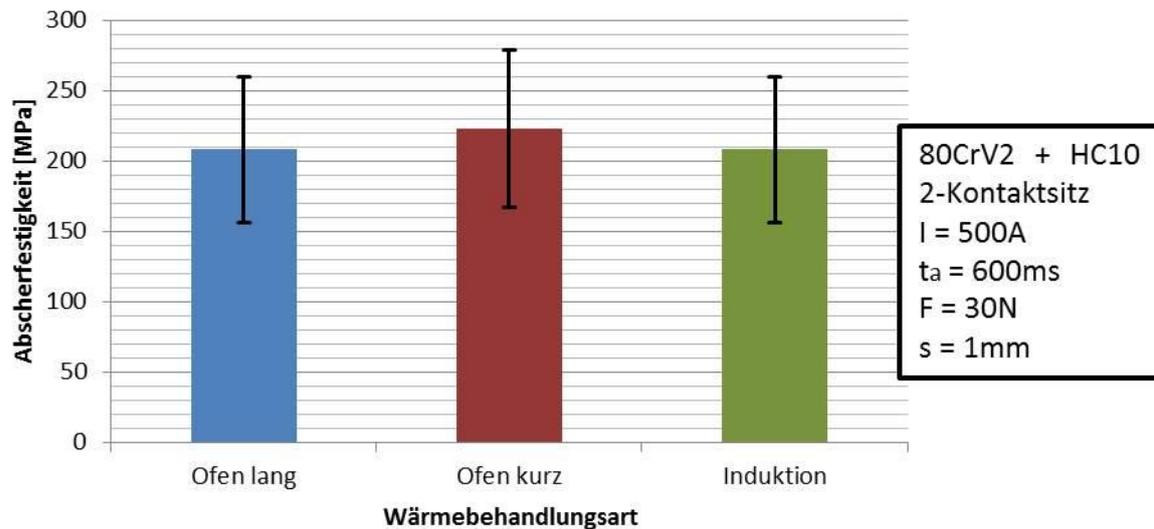


Abbildung 69: Vergleich der Wärmebehandlungsarten

Diese Erkenntnis ist wichtig für den Fall, dass der Wärmebehandlungsprozess umgestellt wird. Eine kürzere Wärmebehandlungszeit würde natürlich einen geringeren Energieaufwand und somit geringere Produktionskosten bedeuten.

4.8.2 Stromübergang Vorrichtung

Das Prinzip des Widerstandschweißens beruht auf dem Prinzip der Joule'schen Erwärmung. Wenn Strom durch ein oder mehrere Bauteile fließt, dann heizt sich dieses über den elektrischen Widerstand auf. Diesen Effekt haben wir uns zunutze gemacht, um den Hartmetallzahn auf das Kreissägeblatt zu schweißen. Der Strom fließt jedoch weiter und muss über die Vorrichtung abgeleitet werden. Das Kreissägeblatt wird großflächig an die Vorrichtung angepresst, um so über die große Fläche eine geringe Stromdichte zu erhalten. Die Praxis hat aber gezeigt, dass feinste Fräsriefen und Unebenheiten der Vorrichtung reichen, um eine punktuelle Auflage zu haben, welche für örtlich große Stromdichten sorgt. Resultat war eine hohe punktuelle Wärmeentwicklung zwischen Vorrichtung und Kreissägeblatt. Abbildung 70 zeigt, wie die Vor-

richtung in Mitleidenschaft gezogen worden ist. Das Aluminium ist örtlich aufgeschmolzen und sofort wieder erstarrt, was für noch mehr Unebenheiten sorgt. Minimale Anteile der Aluminiumvorrichtung bleiben am Kreissägeblatt haften. Dort werden so hohe Temperaturen erreicht, dass es nach der Abkühlung zu einer Aufhärtung dieser Stelle kommt.

Für zukünftige Vorrichtungen wird empfohlen, ähnlich wie bei der Elektrode, eine Auflage aus Kupfer zu verwenden. Diese sollte möglichst glatt sein und es soll hier das Kreissägeblatt gezielt angepresst werden. Kupfer hat gegenüber Aluminium den Vorteil des geringeren elektrischen Widerstandes, was sich auch positiv auf den Übergangswiderstand auswirkt. Außerdem hat es einen höheren Schmelzpunkt (1085°C gegen 660°C), sodass es weniger leicht zu Anhaftungen kommt.

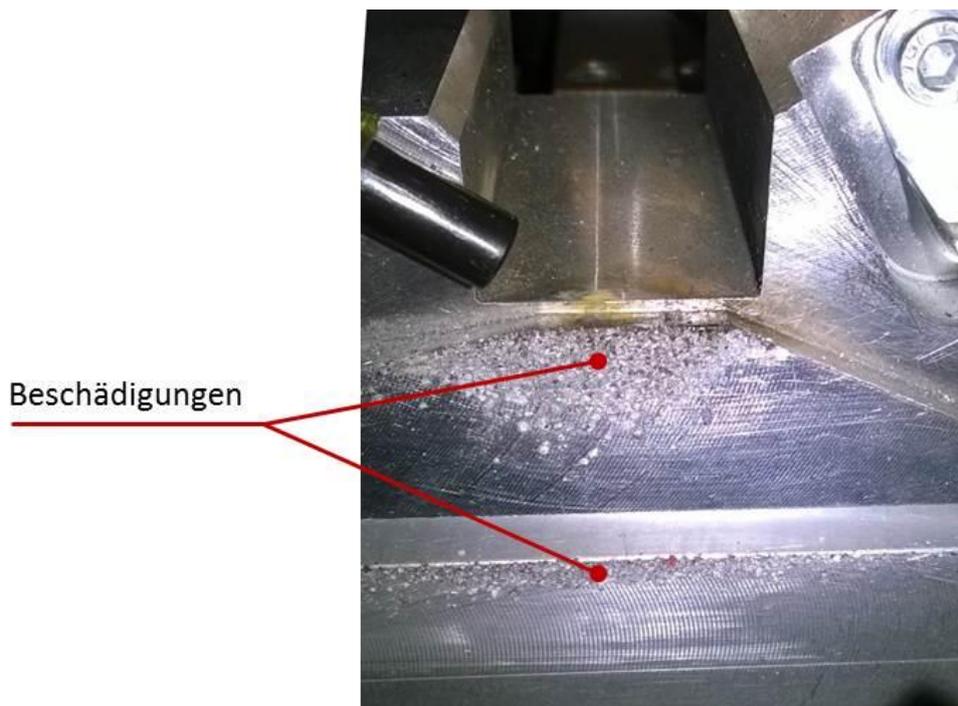


Abbildung 70: Beschädigung der Vorrichtung durch Stromübergang

4.8.3 Spritzer durch Feuchtigkeit

Bei erhöhter Feuchtigkeit und Nässe wurde beobachtet, dass es vermehrt zu Spritzern während des Schweißprozesses kommt. Durch die manuelle Handhabung kam der Hartmetallzahn mit Schweiß und Feuchtigkeit der Haut in Kontakt. Auch wenn die Hartmetallzähne durch ihre geringe Größe mit einer Pinzette manipuliert wurden, so

wurden sie doch immer wieder mit den bloßen Fingern angegriffen. Nachdem die Versuche zu einer sehr heißen Jahreszeit stattfanden, waren diese Finger eben oft mit Schweiß bedeckt. Dieser Schweiß übertrug sich auf das Hartmetall, welches dann beim Schweißprozess für Spritzer sorgte.

Während der Versuche wurde mit Mikrofaserhandschuhen gearbeitet um dieses Problem zu vermeiden. Die Handschuhe verhindern, dass Schweiß auf den Hartmetallzahn kommt und die Mikrofaseroberfläche sorgt dafür, dass jeglicher Schmutz und Staub auf dem Handschuh haften bleibt. Somit können gleichbleibende und saubere Schweißbedingungen gewährleistet werden.

4.9 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Schweißversuche diskutiert. Die Diskussion wird in zwei Teile aufgegliedert. Der erste Teil behandelt die Abscherfestigkeit und der zweite Teil die Streuung der Ergebnisse.

4.9.1 Erreichen des Zielwertes für Abscherfestigkeit

Der Zielwert für die Abscherfestigkeit von 200MPa konnte für keine Materialkombination erreicht werden. Allerdings erreicht man mit den Zielwerkstoffen (191MPa für 80CrV2 und 193MPa für 75CrV1) 95% des Sollwertes, was dennoch als Erfolg gewertet wird.

Positiv bewertet wird auch, dass bei der Abscherprüfung der Bruch immer komplett durch das Hartmetall verläuft und nicht durch das Interface.

Die Abscherprüfung an sich ist jedoch nicht ideal zur Überprüfung der Verbindungsfestigkeit. Es kann nicht gewährleistet werden, dass nicht auch eine Biegespannung auftritt, somit wird keine reine Abscherspannung gemessen. Außerdem entspricht die seitliche Abscherung nicht der tatsächlichen Belastung des Bauteils. Trotzdem ist diese Art der Prüfung eine sehr einfache und deshalb weit verbreitete. Dadurch sind viele Vergleichswerte vorhanden.

4.9.2 Streuung der Ergebnisse

Die erreichte Abscherspannung wird als Erfolg gewertet, aber die hohe Streuung dämpft diesen Eindruck. In diesem Kapitel sollen die Hintergründe für die hohe Streuung beleuchtet werden.

Abbildung 71 zeigt die Bruchbilder von Schweißverbindungen bei verschiedenen großen Abscherfestigkeiten. Allen drei Schweißproben gemeinsam ist, dass der Bruchverlauf vollständig durch das Hartmetall geht und nicht durch das Interface. Das wird als positives Zeichen für die Schweißverbindung gewertet, da die Schweißverbindung offensichtlich höhere Belastungen aushält als der Hartmetallzahn. Man darf nicht außer Acht lassen, dass bei der Abscherprüfung auch eine Biegebeanspruchung auftritt. Die Belastbarkeit von Hartmetall bezüglich der Biegebruchfestigkeit ist sehr kritisch zu betrachten. Hartmetall weist zwar eine wesentlich höhere Härte als Stahl auf, hat aber dafür im Gegenzug eine wesentlich geringere Biegebruchfestigkeit (Abbildung 8)

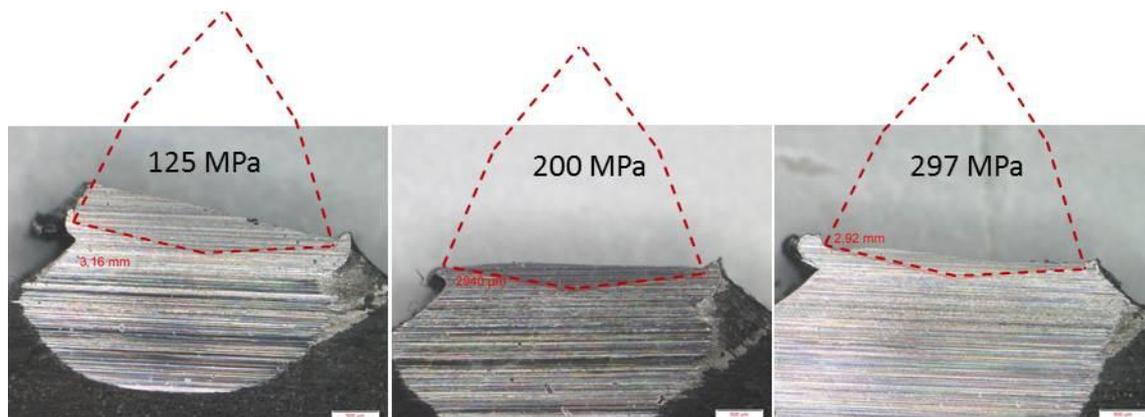


Abbildung 71: Bruchbilder verschiedener Abscherfestigkeiten

Dies erklärt aber noch nicht diese hohe Streuung der Ergebnisse. Dazu muss man verstehen, wie dieser Werkstoff aufgebaut ist.

Aufgrund der pulvermetallurgischen Herstelltechnik, die eine Reinigung durch Schmelzen und Schlackenbildung ausschließt, kann das Auftreten von Poren und Fehlstellen nicht ganz unterdrückt werden. Abgesehen von Einschlüssen und Verunreinigungen können auch durch Dichte-Unterschiede im Pressling und andere Press-

fehler sowie durch metallurgische Vorgänge, beispielsweise durch Gaseinschlüsse, Porosität und Fehlstellen wie Blasen, Spalten usw. entstehen. [5]

Je nach ihrer Art und Größe können Fehlstellen in der Art einer inneren Kerbwirkung schon bereits weit unterhalb der Bruchlast zum vorzeitigen Ausfall durch Bruch führen. Die Auswirkungen von Gefügefehlstellen auf die Festigkeit von WC-Co-Hartmetall wurde bereits in Arbeiten wie [22] eingehend untersucht. [5]

Natürlich muss auch nachgewiesen werden, dass durch die hohen Temperaturen des Schweißprozesses keine Schädigung des Hartmetalls auftritt. [1] zeigt, dass bei zunehmender thermischer Belastung es zu einer Porenbildung im Hartmetall kommen kann. Somit ist es notwendig die Schweißproben im Lichtmikroskop auf Schädigungen wie Poren zu überprüfen.

Die Untersuchung im Lichtmikroskop zeigt keine Risse und Poren im Hartmetall. Die Härtemessungen bestätigen, dass das Hartmetall durch den Schweißprozess nicht negativ beeinflusst wird. Allerdings kommt es zu Mischungsvorgängen im Nahbereich der Schweißstelle, wo Wolframcarbide in den Stahl eingetragen werden. Diese Einträge werden von neuen nickelhaltigen Phasen gesäumt. In den in dieser Arbeit erfolgten statischen Abschertests konnte keine negative Auswirkung dieser Mischungen festgestellt werden. Durch die dynamische Belastung beim Sägen könnten diese Stellen aber Ausgangspunkt von Rissen werden. Deshalb sollten diese Bereiche im Falle eines Säge-Einsatzes unter Beobachtung bleiben.

Bei gelöteten Verbindungen ist die Streuung wesentlich geringer. Dies resultiert aus der Tatsache, dass hier das Lot die Schwachstelle ist und der Bruch immer vollständig durch die Lötnaht geht. Somit sind die Bruchfläche und der Ort des Bruches immer gleich. Außerdem hat das Lot einen wesentlich homogeneren Aufbau als das Hartmetall.

Als Fazit kann gesagt werden, es ist ein gutes Zeichen, dass das Hartmetall versagt und nicht die Schweißstelle. Die hohe Streuung resultiert aus dem inneren Aufbau des Hartmetalls, das inhomogen ist. Nachdem der Werkstoff auch sehr spröde ist, können kleine Fehlstellen schon große Auswirkungen auf die Festigkeit haben.

4.10 Empfehlung für andere Fügegeometrien

Die für die Versuche gewählte Zahnform und Stammblattgeometrie wird bei Dünnschnittsägen angewendet. Je nach zu sägendem Werkstoff und je nach Anwendungsgebiet gibt es unterschiedliche Zahnformen und –größen. Auch der Stammblattdurchmesser und die Stammblattdicke sind je nach Anwendung sehr unterschiedlich. Dadurch besteht die Motivation, die hier gewonnenen Erkenntnisse auch bei anderen Geometrien anwenden zu können.

Leider fehlen entsprechende Versuche, um Aussagen über das Verhalten des Schweißprozesses bei anderen Geometrien machen zu können. Es können also nur Empfehlungen abgegeben werden, die vor ihrer Anwendung erst überprüft werden müssen. Versuche aus anderen Literaturstellen (z.B.: [23], [1]) können auch nur bedingt zum Vergleich herangezogen werden, da hier andere Zahnformen verwendet wurden.

Um dennoch eine Empfehlung abgeben zu können, wird nach einer geometrieunabhängigen Größe für Schweißstrom I und Elektrodenkraft F gesucht. Diese erhält man, wenn man diese beiden Größen durch die Verbindungsfläche A dividiert. Dadurch bekommt man die Stromdichte J [A/mm^2] und den Fügedruck p [MPa].

$$I = 500A, F = 30N, l = 3mm, b = 0,9mm$$

$$A = l * b = 3 * 0,9 = 2,7mm^2$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{500}{2,7} = 185 A/mm^2$$

$$p = \frac{F}{A} = \frac{30}{2,7} = 11,1 MPa$$

Die Parameter l und b entsprechen den Abmessungen der Verbindungsfläche, l beschreibt die Zahnlänge und b die Stammblattdicke.

Wie beim Widerstandspunktschweißen üblich [13], wird mithilfe dieser Größen Schweißstrom und Elektrodenkraft linear auf die Größe der Verbindungsfläche aufklariert.

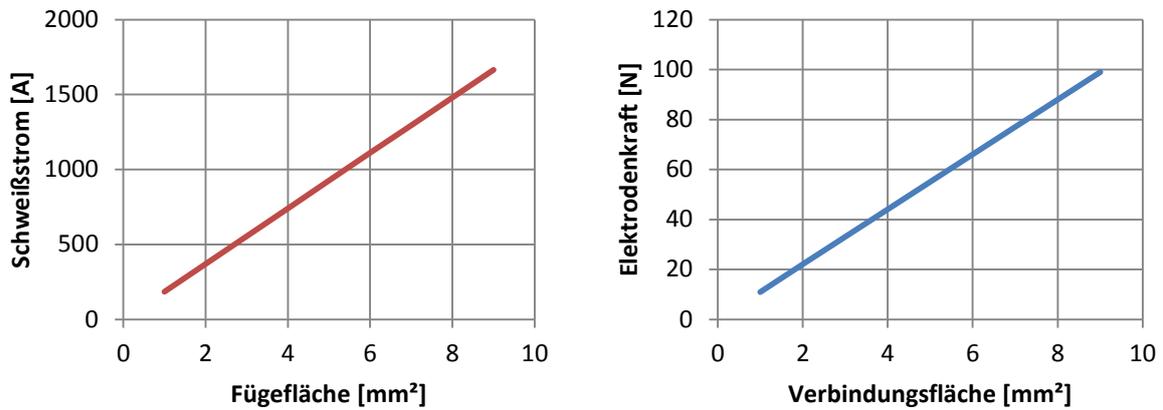


Abbildung 72: Empfehlung für Schweißstrom (links) und Elektrodenkraft (rechts) bezogen auf die Verbindungsfläche.

Diese Werte sind nicht verifiziert und gelten nur als Richtwert für neue Versuchstartpunkte.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde durch die Anwendung von der Methode „Design of Experiments“ (DoE) die Abscherfestigkeit einer widerstandsgeschweißten Verbindung zwischen einem Hartmetallzahn und einem Stahlträger maximiert.

Im Vorfeld wurden in einem Brainstorming die wesentliche Einflussfaktoren des Widerstandsschweißens ausgewählt die untersucht werden: Schweißstrom, Stromanstiegszeit, Schweißzeit, Elektrodenkraft, Kontaktsitzgeometrie, Elektrodenwerkstoff, Stammbblattqualität und Hartmetallsorte.

In der ersten Versuchsreihe wurden die Grenzen festgestellt, innerhalb welcher eine Schweißverbindung überhaupt möglich ist. Diese Grenzen des Schweißbereiches wurden als Faktorstufen für den Screeningversuch weiterverwendet.

Im Screeningversuch wurde ein 2^{4-1} fraktioneller faktorieller Versuchsplan eingesetzt, um den Einfluss der Faktoren auf die Abscherfestigkeit zu untersuchen. Jeder Parametersatz wurde mindestens 6-mal wiederholt, was in einer Gesamtzahl von 54 Versuchen für jede Materialpaarung (Stammbblattqualität + Hartmetallsorte) resultiert.

Die Analyse des Screeningversuchs zeigte den Effekt der Faktoren auf die Abscherfestigkeit. Es konnte gezeigt werden, dass sich der 2-Kontaktsitz besser verhält als der 1-Kontaktsitz. Als Hartmetallsorte wurde HC10 für zukünftige Versuche festgelegt und die zu untersuchenden Schweißparameter konnten von vier auf drei reduziert werden. Der Einfluss der Schweißelektroden ist nur sehr gering, hier wurde beschlossen, künftige Versuche mit der WL20-Elektrode zu schweißen.

Im Hauptversuch wurde ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan angewendet, um die quadratische Abhängigkeit der Faktoren zu untersuchen und ein Optimum der Abscherfestigkeit zu finden. Es wurden hierfür neue Eckpunkte definiert, um das Parameterfenster hinsichtlich besserer Resultate zu verschieben. Ein Versuchsplan besteht aus 20 Punkten, die jeweils 10-mal wiederholt wurden, dadurch ergibt sich ein Aufwand von 200 Versuchen pro Materialpaarung.

Das Ergebnis des Hauptversuchs war nicht zufriedenstellend, da kein Optimum gefunden werden konnte. Dies führte zu der Idee die Schweißzeiten zu verlängern. Resultat dieser Idee war eine höhere Wärmeeinbringung, das wiederum eine bessere

Benetzung des Stahlschweißbades um den Hartmetallzahn zur Folge hatte. Diese Verbindungen zeigten ein ähnliches Festigkeitsniveau wie gelötete Fügeverbindungen.

Im Bestätigungsversuch konnte dieses Festigkeitsniveau bestätigt werden. Hier wurde ein einziger Parametersatz 180-mal wiederholt. Jedoch zeigten die Ergebnisse eine hohe Streuung. Da die Fügeverbindung immer im Hartmetallzahn bricht, lässt sich dies auf das natürliche Bruchverhalten des Hartmetalls zurückführen. Der inhomogene Aufbau und das spröde Verhalten des Werkstoffes sorgen für große Schwankungen im mechanischen Verhalten.

In der metallographischen Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass es durch den Schweißprozess zu keiner Schädigung (z.B.: durch Poren) des Hartmetallzahns kommt.

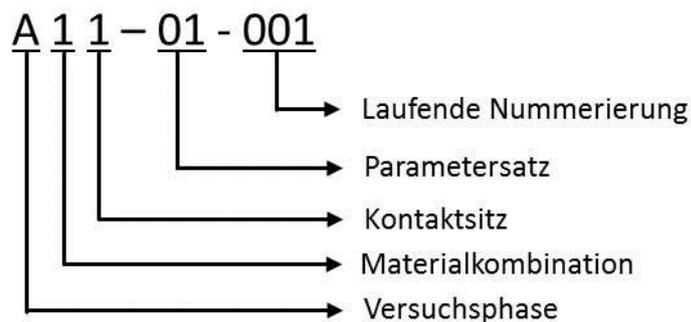
Es konnte gezeigt werden, dass das Widerstandsschweißen von Hartmetall auf Stahl mit gelöteten Verbindungen mithalten kann. Das Ergebnis ist besonders erfreulich, da es mit den Zielwerkstoffen erreicht werden konnte. Es kann also auf bereits etablierte Werkstoffe in der Kreissägeblattfertigung zurückgegriffen werden.

Mit dieser Arbeit ist man dem schlussendlichen Ziel, der Anwendung dieser Technologie in der Serienfertigung von Kreissägeblättern ein großes Stück näher gekommen. Als weitere Schritte sind in der Zukunft Schnittversuche mit geschweißten Dünnschnittsägen geplant. Dies wird zeigen, wie sich die geschweißte Verbindung in einer realen Umgebung verhält. Zeigt dieser Schritt auch positive Ergebnisse, wird der Bau einer vollautomatischen Schweißanlage geplant und diese Schweißtechnologie auch bei anderen Kreissägetypen angewendet. Durch die wesentlich geringeren Fertigungszeiten wird ein enormer wirtschaftlicher Vorteil erwartet. Aber auch das Wegfallen des Flussmittels, die Einsparung von Hartmetall und der geringere energetische Aufwand sprechen aus umwelttechnischer Sicht für diese Technologie.



6 Anhang

Grafik 1: Beschriftungssystem	88
Table 1: Beschriftungssystem	88
Table 2: Beschriftungssystem - Parametersätze	89
Diagramm 1: Abscherversuch (80CrV2 + HC10, Vorrichtung Böhlerit, Zwick Z020) 90	
Diagramm 2: Abscherversuch (80CrV2 + HC10, Vorrichtung Leitz, Zwick Z020).....	91
Diagramm 3: Abscherversuch (75Cr1 + HC10, Vorrichtung Böhlerit & Leitz, Zwick Z020)	92
Zeichnung 1: Zeichnung Kreissägeblatt mit 1-Kontaktsitz	94
Zeichnung 2: Zeichnung Kreissägeblatt mit 2-Kontaktsitz	95



Grafik 1: Beschriftungssystem

Table 1: Beschriftungssystem

Versuchsphase	
A	Vorversuch
B	Screeningversuch
C	Vollversuch
D	Bestätigungsversuch
E	Versuch mit langer Temperaturführung
F	Versuch mit zylindrischen Zähnen
Materialkombination	
1	75Cr1 + HC10
2	75Cr1 + CTS18-D
3	80CrV2 + HC10
4	80CrV2 + CTS18-D
5	27MnCrB5-2 + HC10
6	27MnCrB5-2 + CTS18-D
7	48 CrMoNiV 4-4 + HC10
8	48 CrMoNiV 4-4 + CTS18-D
9	X20 CrMo 13 + HC10
0	X20 CrMo 13 + CTS18-D
Kontaktsitz	
1	1-Kontaktsitz
2	2-Kontaktsitz

Table 2: Beschriftungssystem - Parametersätze

Parametersatz					
Nr.	Schweißstrom I [A]	Stromanstiegszeit t _a [ms]	Schweißzeit t _s [ms]	Elektrodenkraft F [N]	Einsinkweg s [mm]
1	850	45	60	70	-
2	700	10	30	30	-
3	1000	10	30	110	-
4	700	80	30	110	-
5	1000	80	30	30	-
6	700	10	100	110	-
7	1000	10	100	30	-
8	700	80	100	110	-
9	1000	80	100	110	-
10	850	40	-	30	-1
11	1000	80	-	30	-1
12	1000	40	-	60	-1
13	850	80	-	60	-1
14	925	60	-	45	-1
15	925	60	-	45	-1
16	1000	40	-	30	-1
17	850	80	-	30	-1
18	850	40	-	60	-1
19	1000	80	-	60	-1
20	925	60	-	45	-1
21	925	60	-	45	-1
22	800	60	-	45	-1
23	1050	60	-	45	-1
24	925	27	-	45	-1
25	925	93	-	45	-1
26	925	60	-	20	-1
27	925	60	-	70	-1
28	925	60	-	45	-1
29	925	60	-	45	-1
30	600	500	-	30	-1
31	500	600	-	30	-1
32	450	750	-	30	-1
33	400	900	-	30	-1

Diagramm 1: Abscherversuch (80CrV2 + HC10, Vorrichtung Böhlerit, Zwick Z20)



Standardprotokoll

13.10.2015

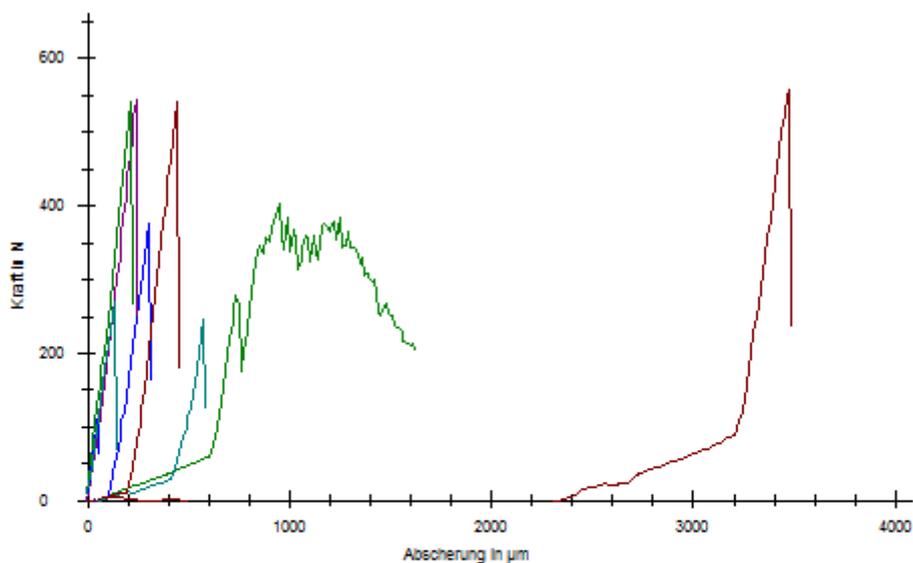
Parametertabelle:

80CrV2 + HC10(D31)
Vorrichtung Böhlerit

Ergebnisse:

Nr	N	FMax
1	557,74	
2	402,10	
3	374,89	
4	245,28	
5	544,39	
6	541,13	
7	540,35	
8	121,90	
9	270,68	

Seriengrafik:



Statistik:

n = 9	N	FMax
x	399,83	
s	159,68	
v	39,94	

Diagramm 2: Abscherversuch (80CrV2 + HC10, Vorrichtung Leitz, Zwick Z020)



Standardprotokoll

13.10.2015

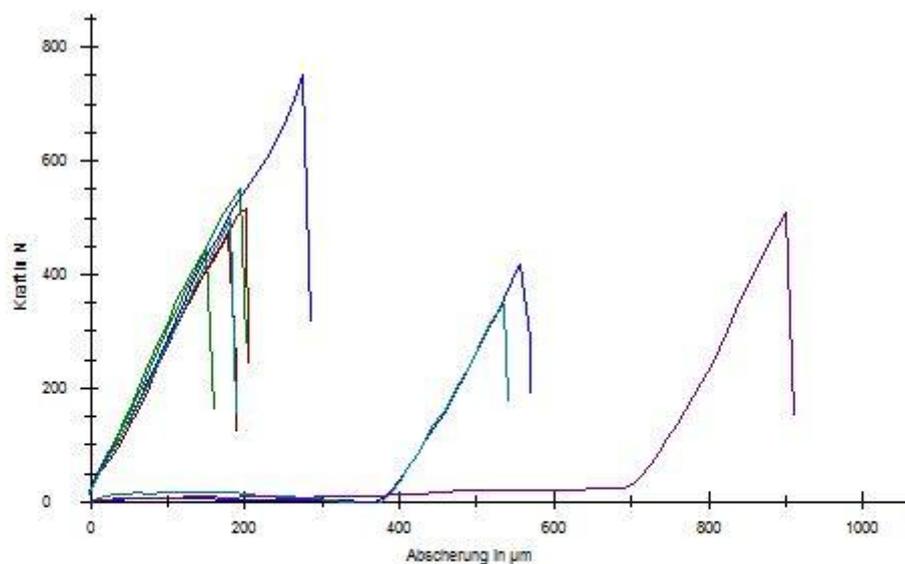
Parametertabelle:

80CrV22+HC10(DC31)
Vorrichtung Leitz

Ergebnisse:

Nr	N	FMax
1	517,14	
2	440,82	
3	416,53	
4	348,58	
5	509,51	
6	469,98	
7	549,43	
8	751,66	
9	498,57	

Seriengrafik:



Statistik:

n = 9	N	FMax
x	500,25	
s	112,06	
v	22,40	

Diagramm 3: Abscherversuch (75Cr1 + HC10, Vorrichtung Böhlerit & Leitz, Zwick Z020)



Parametertabelle:

75Cr1 + HC10 (D31)
 1-10 Vorrichtung Böhlerit
 11-20 Vorrichtung Leitz

Ergebnisse:

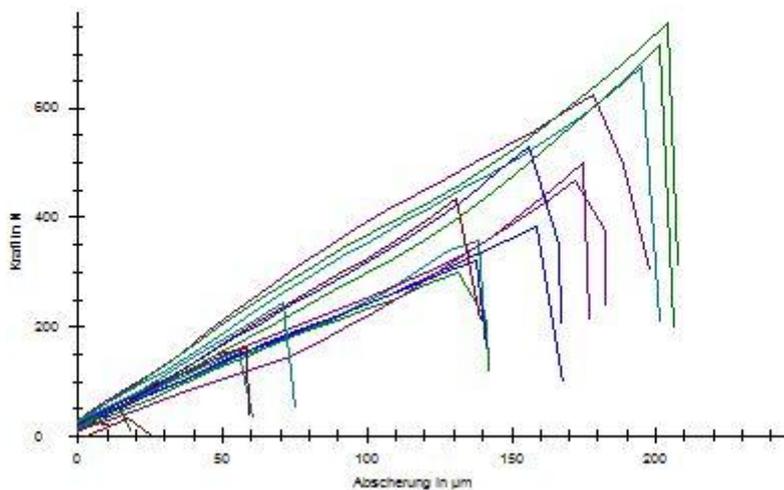


FMax	
Nr	N
1	32,06
2	49,68
3	384,91
4	358,81
5	466,18
±6	35,99
7	29,23
8	299,44
9	322,58
10	157,93
11	623,87
12	160,55
13	755,83
14	39,66
15	675,30
16	499,85
17	435,60
18	717,72
19	531,67
20	245,72
FMax	
Nr	N
1	32,06
2	49,68
3	384,91
4	358,81
5	466,18
±6	35,99
7	29,23
8	299,44
9	322,58
10	157,93
11	623,87
12	160,55
13	755,83
14	39,66
15	675,30
16	499,85
17	435,60
18	717,72
19	531,67
20	245,72



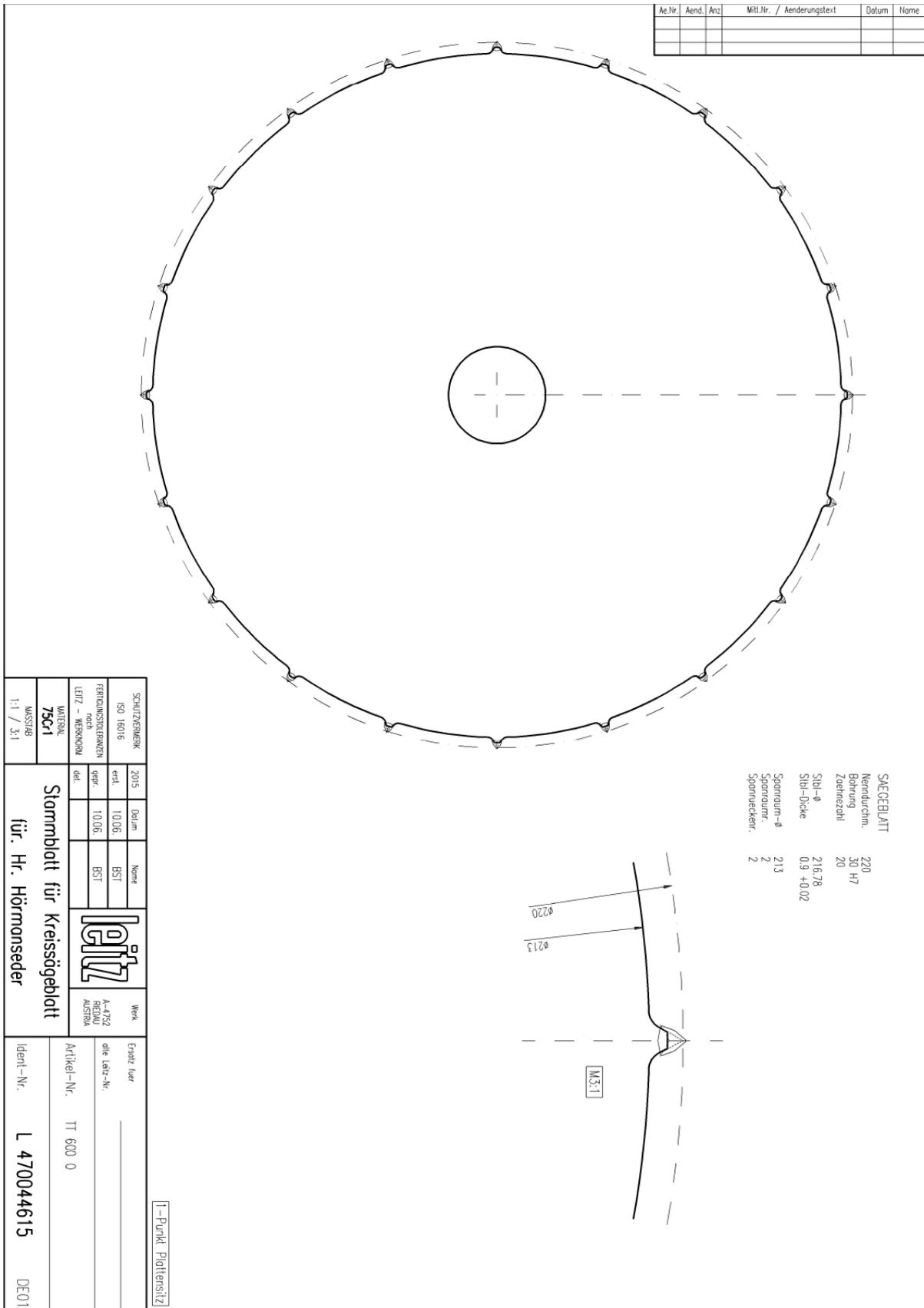


Seriengrafik:

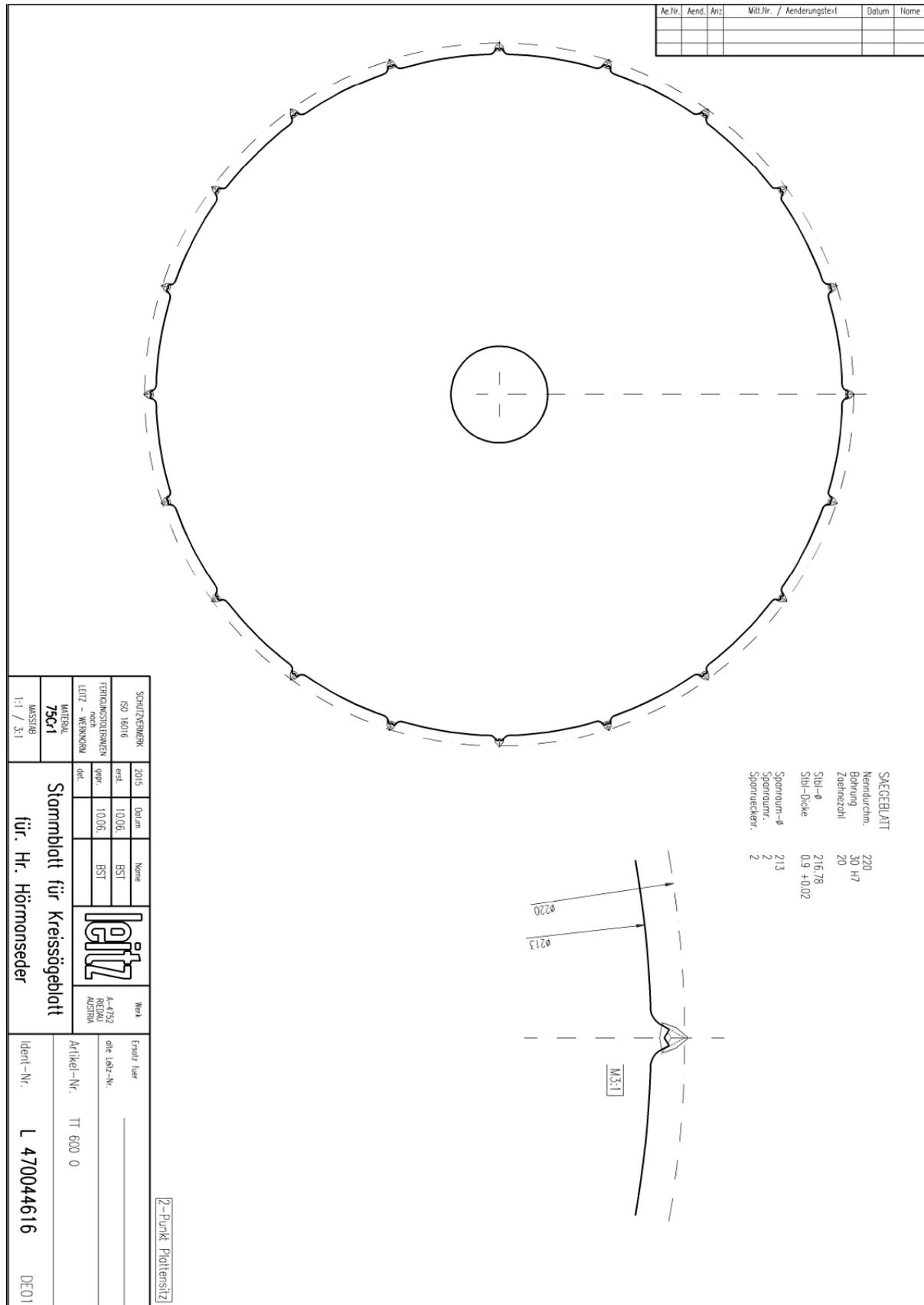


Statistik:

	FM _{ax}
n = 19	N
x	357,19
s	239,77
v	67,13



Zeichnung 1: Zeichnung Kreissägeblatt mit 1-Kontaktsitz



Zeichnung 2: Zeichnung Kreissägeblatt mit 2-Kontaktsitz

7 Verzeichnisse

7.1 Formelverzeichnis

Formel 1: Joul'sches Gesetz	16
Formel 2: Effekt A und B [14].....	19
Formel 3: Wechselwirkung [14]	19
Formel 4: vereinfachtes Joul'sches Gesetz.....	53
Formel 5: Versagenswahrscheinlichkeit nach Weibull	67

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kreissägeblatt [3].....	3
Abbildung 2: Winkel und Teilung am Sägezahn; Bandsäge (links); Kreissäge (rechts); α Freiwinkel; β Keilwinkel; γ Spanwinkel; T Teilung; t Zahntiefe [4].....	5
Abbildung 3: Ausschnitt eines bestückten Sägeblattes [3].....	5
Abbildung 4: Zahnformen für bestückte Sägeblätter [3].....	5
Abbildung 5: Hartmetallzahn auf Kreissägeblatt [3]	6
Abbildung 6: Hartmetall (1500x) 15% Co, Rest WC [5]	7
Abbildung 7: Fügen von Hartmetall mit Metall [5]	7
Abbildung 8: Eigenschaften von Hartmetall im Vergleich zu anderen Werkstoffen [6]	9
Abbildung 9: Vergleich von Wärmeleitfähigkeit λ (oben) und speziellem elektrischen Widerstand ρ (unten) der Anwendungsgruppen K und P bei Raumtemperatur nach Herstellerangaben, Fa. Plansee TIZIT GmbH. [1]	11
Abbildung 10: Ausschnitt eines hartmetallbesetztem Sägeblattes; Quelle: Umicore [9]	12
Abbildung 11: Schematischer Querschnitt durch ein Schichtlot; [9].....	13
Abbildung 12: Aufbau einer Widerstandsschweißanlage (Prinzipskizze) [1].....	14

Abbildung 13: Zusammenwirken von Stromquelle, Fügeteil und mechanische Maschineneigenschaften beim Widerstandsschweißen. [1] 15

Abbildung 14: Kraft- und Strom-Zeit-Diagramm des Widerstandsschweißprozesses 16

Abbildung 15: Temperaturverlauf (schematisch) in den Fügeteilen beim Widerstandsschweißen [12]..... 17

Abbildung 16: Stromfluss bei geringer (a) und starker (b) Anpresskraft. [1] 18

Abbildung 17: Zwei Faktoren auf je zwei Stufen (2^2 – Versuchsplan) [14]..... 19

Abbildung 18: Unterscheid zwischen fraktionelle (links) und vollständig (rechts) faktoriellen Versuchsplan..... 21

Abbildung 19: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan mit 3 Faktoren [15]..... 22

Abbildung 20: Beispiel eines Haupteffektdiagramms mit 3 Faktoren (A, B, C) [16] .. 23

Abbildung 21: Schematische Darstellung eines Wechselwirkungsdiagramms [16] .. 23

Abbildung 22: Beispiel eines Oberflächenmodells [16] 24

Abbildung 23: Kreissägeblatt im Maßstab 1:2 26

Abbildung 24: Detail A: Geometrie der beiden Plattensitze 26

Abbildung 25: Hartmetall - Zahngeometrie 28

Abbildung 26: Schweißelektroden 29

Abbildung 27: Versuchsplan 31

Abbildung 28: Flussdiagramm 33

Abbildung 29: Die fünf Schritte einer Versuchsstufe..... 34

Abbildung 30: Schweißanlage 35

Abbildung 31: Detail A der Schweißanlage..... 36

Abbildung 32: Temperaturkurve der Wärmebehandlung 37

Abbildung 33: Schleifprozess 38

Abbildung 34: Abscherprobe im Maßstab 3:1 38

Abbildung 35: Abschervorrichtung schematischer Aufbau..... 39

Abbildung 36: Handhebelpresse.....	40
Abbildung 37:Beschriftungssystem	40
Abbildung 38: Beispiel einer Beschriftung	41
Abbildung 39: Ishikawa – Diagramm, mögliche Einflussgrößen auf die Abscherfestigkeit der Widerstandsschweißverbindung.	43
Abbildung 40: Ausgewählte Einflussgrößen und die Zielgröße des Schweißprozesses	44
Abbildung 41: Kraft- und Strom-Zeit-Diagramm des Widerstandsschweißprozesses	45
Abbildung 42: Schweißbereich einer Widerstandsschweißung [13]	46
Abbildung 43: Aufteilung der Screeningversuche	49
Abbildung 44: Einsinkweg.....	50
Abbildung 45: Effekt der Hauptfaktoren	51
Abbildung 46: Beispiel für eine gute (grün) und eine schlechte (rot) Schweißung....	52
Abbildung 47: Vergleich Plattensitze	54
Abbildung 48: Effekt des Elektrodenwerkstoffes auf die Abscherkraft	55
Abbildung 49: Gestrahlte gegen ungestrahlte Kontaktfläche	56
Abbildung 50: Optimierungsprozess [15].....	58
Abbildung 51: Einsinkweg und Strom-Zeit-Kurve	59
Abbildung 52: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan [15].....	60
Abbildung 53: Ergebnis der Abscherprüfung mit Standardabweichung für Materialkombination 80CrV2 + HC10	61
Abbildung 54: Effekt der Faktoren auf Abscherkraft.	62
Abbildung 55: Bruchflächen bei der Vollversuchsreihe.....	62
Abbildung 56: Vergleich zwischen normaler und langer Stromkurve.....	64
Abbildung 57: Schweißung mit langer Schweißzeit (grün) und mit normaler Schweißkurve (rot) (80CrV2 + HC10, 2-Kontaktsitz)	65

Abbildung 58: Ergebnis verschieden langer Stromkurven (80CrV2 + HC10, 2-Kontaktsitz)..... 66

Abbildung 59: Verteilung der Abscherfestigkeit (links) und Ausfallswahrscheinlichkeit (rechts) nach 180 geprüften Schweißverbindungen (80CrV2 + HC10); Weibullparameter: $m_0 = 4$, $\sigma_0 = 210$;..... 68

Abbildung 60 Verteilung der Abscherfestigkeit (links) und Ausfallswahrscheinlichkeit (rechts) nach 120 geprüften Schweißverbindungen (75Cr1 + HC10); Weibullparameter: $m_0 = 4,1$, $\sigma_0 = 220$;..... 69

Abbildung 61: Erreichte Bestwerte für alle Stamblattqualitäten 70

Abbildung 62: Vergleich verschiedener Abscherprüfvorrichtungen (Z020...Tischprüfmaschine, HHP...Handhebelpresse) 71

Abbildung 63: Ungeätztes Schliffbild (80CrV2 + HC10)..... 73

Abbildung 64: Detail A in Vergrößerung (ungeätzt) 73

Abbildung 65: Mischungen in Vergrößerung (geätzt) Links: Ätzung mit Murakami Rechts: Ätzung mit Murakami + Nital..... 74

Abbildung 66: Detail B: Nickelschicht am Hartmetallzahn außerhalb des Interfaces 75

Abbildung 67: Härtemessung der geschweißten Verbindung (80CrV2 + HC10) vor und nach der Wärmebehandlung 76

Abbildung 68: Die drei Wärmebehandlungen 77

Abbildung 69: Vergleich der Wärmebehandlungsarten 78

Abbildung 70: Beschädigung der Vorrichtung durch Stromübergang 79

Abbildung 71: Bruchbilder verschiedener Abscherfestigkeiten 81

Abbildung 72: Empfehlung für Schweißstrom (links) und Elektrodenkraft (rechts) bezogen auf die Verbindungsfläche. 84

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennzeichnung, mittlere Zusammensetzung und Eigenschaften der Hartmetall-Sorgen (1958) [5]	10
Tabelle 2: Vollständig faktorieller Versuchsplan [14]	20
Tabelle 3: Faktorstufenkombinationen eines zentral zusammengesetzten Versuchsplan für k = 3 Faktoren [14].....	22
Tabelle 4: Chemische Analyse der Stammblattmaterialien [17].....	27
Tabelle 5: Verwendete Hartmetall-Qualitäten [18]	28
Tabelle 6: Geplante Materialkombinationen (Hartmetall und Stammblatt) mit ihrer Priorität (1...hoch, 10...niedrig)	31
Tabelle 7: Beschriftungssystem.....	41
Tabelle 8: Ergebnis der Vorversuche	47
Tabelle 9: Versuchsplan für die Schweißparameter	48
Tabelle 10: Faktorstufen Vollversuch	58
Tabelle 11: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan mit Werten.....	60
Tabelle 12: Wärmebehandlungen.....	77

8 Literaturverzeichnis

[1] M. J. Greitmann, Untersuchungen zum Widerstandsschweißen von Hartmetall auf Stahl, Stuttgart: MPA Stuttgart, 1992.

[2] „Fachwissen Technik,“ [Online]. Available: <http://www.fachwissen-technik.de/verfahren/saegen.html>. [Zugriff am 8 Juli 2015].

[3] Leitz-Lexikon, Oberkochen: Leitz GmbH, 2011.

-
- [4] H. Tschätsch, „Praxiswissen Zerspantechnik: Verfahren, Werkzeuge, Berechnung,“ Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1994.
- [5] W. Schedler, Hartmetall für den Praktiker, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1988.
- [6] „Das ist Hartmetall,“ Sandvik, [Online]. Available: [http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/Hi/SE03411.nsf/a0de78d35676d88d412567d900294747/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/\\$FILE/ATTGAHWR/9100%20ger.pdf](http://www2.sandvik.com/sandvik/0130/Hi/SE03411.nsf/a0de78d35676d88d412567d900294747/4c7827530abfa4e1c1256b0a0034cc36/$FILE/ATTGAHWR/9100%20ger.pdf). [Zugriff am 6 Juli 2015].
- [7] B. Schimpfermann, „Hartlöten von HW- Schneidwerkzeugen,“ Unicorn AG und Co. KG, Hanau, 2011.
- [8] ÖGUSSA, „Silberreduzierte Lote für die Werkzeugindustrie,“ *Schweiss- und Prüftechnik*, Nr. 09/10, 2015.
- [9] M. S. M. Bronny, „Hartlöten von HW-Schneidwerkzeugen,“ Umicore AG & Co. KG, Hanau, 2014.
- [10] K. H. B. Weuse, „Einsatz innovativer lote in der Schneidtechnik,“ Degussa-Hüls, 1995.
- [11] „Hartlöten - Lote (ISO/DIS 17672:2015),“ 2015.
- [12] V. S. J. T. Hans J. Fahrenwaldt, „Praxiswissen Schweißtechnik - Werkstoffe, Prozesse, Fertigung,“ Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [13] Ruukki, „Resistance Welding Manual,“ Rautarookki Corporation, Helsinki, 2015.
- [14] W. Kleppmann, Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren, München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [15] B. Giger, „Design of Experiments- Einführung in die statistische Versuchsplanung (DoE),“ TQU AG, Winterthur, 2014.

-
- [16] B. H. Siebertz, „Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE),“ Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [17] M. W. C. Wegst, Stahlschlüssel, Marbach: Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, 2007.
- [18] C. Group, Wod Working Gesamtkatalog, Marmer: Cerazit S.A., 2015.
- [19] M. M. GmbH, „SPATZStudioNET,“ Alsdorf, 2015.
- [20] T. Sailer, „Ultrafeinkörnige Hartmetalle mit Co-Binder und alternativen Bindersystemen - Korrelation von Mikrostruktur und mechanischem Verhalten unter monoton ansteigender und zyklisch wechselnder Belastung,“ Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 2002.
- [21] G. Petzow, „Metallographisches, Keramographisches, Plastographisches Ätzen,“ Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart, 2006.
- [22] P. B. Anderson, Der Einfluss von Verunreinigungen auf die Eigenschaften von WC-Co-Legierungen am Beispiel von Gesteinsbohrlegierungen, Graz: Technische Universität Graz, 1976.
- [23] I. U. S. IMWF Universität Stuttgart und F. Rosenhein, „Verlängerung der Standzeit von Blockbandsägewerkzeugen,“ Stuttgart, 2004.
- [24] J. Antony, Design of Experiments for Engineers and Scientists, Edingburgh: Elsevier Ltd., 2014.
- [25] Alber Sägeblätter, [Online]. Available: <http://www.alber-saegen.de/bandsaegeblaetter/holz/blockbandsaegeblaetter.html>. [Zugriff am 2015 Juli 2015].