

**Aus der Universitätspoliklinik für Zahnärztliche Prothetik
an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg**

(Direktor: Prof. Dr. J. Setz)

Sektion Zahnärztliche Propädeutik

(Leiter: Prof. Dr. K.-E. Dette)



**Untersuchungen zum Einfluss ausgewählter Parameter
auf die Zugfestigkeit lasergeschweißter Edelstahldrähte**

**Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Zahnmedizin (Dr. med. dent.)**

**vorgelegt
der Medizinischen Fakultät
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg**

**von Uta Zimmermann
geboren am 12.09.1974 in Leipzig**

Gutachter:

1. Prof. Dr. K.-E. Dette
2. Prof. Dr. Dr. R. Fuhrmann
3. Prof. Dr. U. Hirschfelder

Halle, 29.09.2005

urn:nbn:de:gbv:3-000009968

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000009968>]

Referat und bibliographische Beschreibung

Das Laserschweißen wurde in den letzten Jahren sehr umfangreich bezüglich eines Einsatzes bei der Verbindung von gegossenen Legierungen untersucht. Der Vorteil dieser Technik liegt in der Möglichkeit begründet, die Werkstücke ohne einen Zusatzwerkstoff anderer Zusammensetzung verbinden zu können. Des Weiteren kann mit Hilfe des Laserstrahls die Beeinflussung des Werkstoffes durch die gebündelt einwirkende Energie nahezu ausschließlich auf den Bereich der Verbundzone reduziert werden. Bisher ist nur in wenigen Studien eine Nutzung des Laserstrahlschweißens zum Fügen von Drähten, wie sie in der Kieferorthopädie eingesetzt werden, geprüft worden. In der hier vorliegenden Arbeit soll deshalb der Einfluss der Laserparameter Impulslänge, Spannung und Fokus auf die Zugfestigkeit lasergeschweißter Chrom-Nickel-Drähte untersucht werden.

Dafür wurden Remanium®-Drähte des Durchmessers 1,0 mm mit einer Überlappung von 5 mm parallel gelagert und verschweißt. Die Laserparameter Spannung, Impulslänge und Fokus des Schweißgerätes NEOLASER L 126500 der Firma Girrbach Dental GmbH wurden so variiert, dass 100 verschiedene Laserparameterkombinationen zum Einsatz kamen. Die entstandenen Verbindungen wurden bezüglich ihrer Oberflächenqualität klassifiziert und einer Zugfestigkeitsuntersuchung unterzogen. Mit 31 Laserparameterkombinationen konnten Verbindungen mit einer fehlerfreien Oberfläche hergestellt werden, deren Zugfestigkeitswerte sich statistisch signifikant von den 38 Verbindungen mit Fehlern an der Oberfläche unterschieden. Weitere 25 Laserparameterkombinationen führten zu einer makroskopisch sichtbaren Materialschädigung, 6 Parameterkombinationen erzeugten keine Verbindung der Drähte. Diese 31 Prüfkörpergruppen wurden keiner Zugfestigkeitsuntersuchung unterzogen. Bezuglich des Einflusses der Laserparameter konnte nur für die Impulslänge ein statistisch signifikanter Einfluss auf die Zugfestigkeit und die Oberflächenqualität der Verbindungen nachgewiesen werden. Die Laserspannung beeinflusst dagegen signifikant die Lokalisation der Bruchstelle bei der Zugfestigkeitsprüfung.

Die beispielhaft durchgeführte mikroskopische Untersuchung der Gefügeentwicklung im Schweißnahtbereich einzelner Verbindungen konnte in allen untersuchten Proben die Entwicklung einer Wärmeeinflusszone nachweisen, deren Ausprägung und Ausdehnung von den eingesetzten Laserparametern abhängig ist.

Zimmermann, Uta: Untersuchungen zum Einfluss ausgewählter Parameter auf die Zugfestigkeit lasergeschweißter Edelstahldrähte. Halle, Martin-Luther-Universität, Medizinische Fakultät, Zahnmedizinische Dissertation, 78 Seiten, 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturübersicht	3
2.1	Das Laserprinzip	3
2.2	Die Wirkung des Lasers auf Materie – Schmelzen und Schweißen	6
2.3	Das Laserschweißen in der Zahntechnik	7
2.3.1	Das Laserschweißen in der kieferorthopädischen Technik	8
2.3.2	Die Festigkeit lasergeschweißter Verbindungen im Vergleich zum Löten	11
2.3.3	Der Einfluß der Prozessparameter auf die Qualität der Laserverbindung	15
2.3.4	Die Verbindung von Edelmetallen mit Nichtedelmetallen	19
2.3.5	Schlussfolgerungen für die eigenen Untersuchungen	20
3	Material und Methoden	21
3.1	Untersuchungsmaterial	21
3.2	Das Laserschweißgerät	22
3.3	Probenvorbereitung	24
3.4	Haltevorrichtung zum Laserschweißen – Kreuztisch	25
3.5	Voruntersuchungen	26
3.6	Erstellen der Versuchsreihe	27
3.7	Zugfestigkeitsprüfung	28
3.8	Mikroskopische Untersuchungen	29
3.9	Statistische Auswertung	31
4	Untersuchungsergebnisse	32
4.1	Beurteilung der Oberflächenqualität	32
4.1.1	Der Einfluss der Laserparameter auf die Qualität der Oberfläche	35
4.2	Die Zugfestigkeit für den Drahtdurchmesser 1,0 mm	38
4.2.1	Der Einfluss der einzelnen Laserparameter auf die Zugfestigkeit	38
4.2.2	Das Zusammenwirken aller drei Laserparameter	41
4.3	Die Lokalisation der Bruchstelle und der Einfluss der Laserparameter	45
4.4	Zugfestigkeitsergebnisse für die Drahtstärke 0,7 mm und 0,8 mm	50
4.5	Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen	52

5	Diskussion	58
5.1	Kritische Wertung der Methodik	58
5.2	Diskussion der Ergebnisse	61
5.2.1	Der Einfluss der Laserparameter	63
5.2.2	Gefügeuntersuchungen	67
5.3	Ausblick	69
6	Zusammenfassung	70
7	Literaturverzeichnis	72
8	Thesen	77

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
DIN	Deutsche Industriennorm
Fe	Eisen
HCL	Salzsäure
HNO ₃	Salpetersäure
IPL	Impulslänge
I	Intensität
Mn	Mangan
Nd:YAG-Laser	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
Ni	Nickel
P	Phosphor
S	Schwefel
Si	Silizium
®	geschütztes Warenzeichen
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
vs.	versus

1 Einleitung

In der dentalen Technologie sind die sehr komplexen Anforderungen an die Werkstoffe vielfach nur durch Materialkombinationen erfüllbar. Des Weiteren erfordern komplizierte und umfangreiche Konstruktionen sowohl von Zahnersatz als auch von kieferorthopädischen Apparaturen die Vereinigung einzelner Teile zu einem Endprodukt der Zahntechnik, sei es eine Prothese oder ein kieferorthopädisches Gerät. Daher spielen Fügeverfahren seit jeher eine große Rolle.

In der Zahntechnik werden bereits verschiedene Technologien zum Fügen von Metallen eingesetzt. Zu diesen Verfahren zählen der An- oder Umguss, das Löten und das Kleben sowie verschiedene Methoden des Schweißens. Für viele Legierungen wurden die genannten Verfahren auf ihre Anwendbarkeit geprüft und die Eigenschaften der entstehenden Verbindungen untersucht.

Mit zunehmendem technischen Fortschritt, der Suche nach effizienten Arbeitsmethoden und der Sensibilisierung der Patienten bezüglich der Biokompatibilität der eingesetzten Materialien gewinnt das Laserschweißen immer mehr an Bedeutung. Auf einen Zusatzwerkstoff anderer Zusammensetzung kann bei dieser Fügemethode verzichtet werden. Im Gegensatz dazu wird das Löten nach der DIN 8505 definiert als „die Verbindung metallischer Werkstoffe mittels eines geschmolzenen Zulegematerials, dem Lot“ (KÖRBER und LUDWIG, 1982). Die Gefahr der Korrosion und damit der Freisetzung von Legierungselementen in die Mundhöhle ist folglich beim Laserschweißen deutlich geringer als beim Löten.

In der Zahntechnik wird das Laserschweißen unter anderem zum Fügen großer Brücken, zur Reparatur von Modellgussprothesen oder zur Herstellung kombiniert festsitzend-herausnehmbaren Zahnersatzes genutzt, um nur einige Beispiele aus dem Bereich der Prothetik zu nennen. Auch in der kieferorthopädischen Technik findet das Laserschweißen Anwendung. So wird bei der Fertigung einer festsitzenden Apparatur im Labor das Schloss an das Band angelasert. Auf diese Weise vermeidet man den Einsatz eines Lotes und somit die Verwendung einer weiteren Legierung. Auch zur Herstellung herausnehmbarer kieferorthopädischer Geräte kann diese Fügetechnologie genutzt werden. Als Beispiel sei die Fertigung einer Crozat-Apparatur genannt, die vollständig aus gebogenem Draht besteht und bei der auf Kunststoff verzichtet wird. Die ursprüngliche Apparatur wurde am Anfang des neunzehnten Jahrhunderts von George B. Crozat entwickelt, der auf die Ideen von Ernest Walker zurückgriff, welcher herausnehmbare Apparaturen aus Edelmetallen einsetzte. Auf einen anderen Wegbereiter des Crozat-Gerätes verweist die Bezeichnung

„Jacksonklammer“. Schon 1887 tauchte der Name Victor Hugo Jackson im Zusammenhang mit der Jackson-Crib-Apparatur auf, welche aus Stahldraht, Neusilber aber auch aus Federgold hergestellt worden ist (SCHWARZKOPF und VOGL, 1980). Seit geraumer Zeit wird auf die Verwendung von Edelmetallen verzichtet und stattdessen vergütbarer Stahldraht eingesetzt (SCHMEIL und HIRSCHFELDER, 1997). Zur Herstellung einer Crozat-Apparatur werden die einzelnen Bestandteile gebogen und anschließend auf dem Modell zusammengefügt, vorrangig durch das Löten, in zunehmendem Maße aber durch das Laserschweißen.

Während für die dentalen Gusslegierungen eine Reihe von Untersuchungen zum Einfluss der Schweißparameter vorliegen, sind die Empfehlungen bezüglich des Laserschweißens kaltgezogener Drahtlegierungen eher spärlich. Aufgrund der unterschiedlichen Legierungszusammensetzungen und Herstellungsarten und der daraus resultierenden abweichenden physikalischen Eigenschaften (z.B.: Energieabsorption, Wärmeleitung) können die an Gusslegierungen gewonnenen Erkenntnisse jedoch nicht prinzipiell auf Drahtlegierungen übertragen werden. Hinzu kommt die spezielle Konfiguration der Fügestelle bei überlapptgeschweißten Drähten, die aus der Verbindung zweier konvexer Körper resultiert. Des Weiteren ist das Materialvolumen zur Wärmeabfuhr deutlich kleiner als zum Beispiel bei der Verbindung von Kronenblöcken zu einer Brücke.

Deshalb ist es Ziel dieser Arbeit, den Einfluss der Laserparameter Spannung, Impulslänge und Größe des Fokus auf die Festigkeit überlapptgeschweißter Chrom-Nickel-Drähte zu bestimmen, wobei die Zugfestigkeit das entscheidende Qualitätsmerkmal ist. Damit soll dem Anwender des Laserschweißgerätes „NEOLASER L 126500“ (Fa. Girrbach-Dental, Pforzheim, D) eine vereinfachte Orientierung zur Wahl der Laserparameter gegeben werden. Den Zahntechnikern wird somit der Umgang mit dem eingesetzten Lasergerät erleichtert. Neben der Angabe von Richtwerten für das Schweißen von Chrom-Nickel-Drähten soll ihnen ein Hilfsmittel zur Einschätzung der erzielbaren Festigkeitseigenschaften der entstehenden Schweißnaht zur Verfügung gestellt werden. Zugleich kann damit ein Beitrag zur Qualitätssicherung in der Zahntechnik geleistet werden.

2 Literaturübersicht

2.1 Das Laserprinzip

Der Name Laser ist die Abkürzung der angelsächsischen Bezeichnung „Light amplification by stimulated emission of radiation“, was sinngemäß heißt: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission. Das bedeutet: Die Photonenaussendung erfolgt nicht wie bei einer natürlichen Lichtquelle spontan, sondern wird gezielt induziert bzw. stimuliert. Dabei werden durch ein äußeres Strahlungsfeld mit der Quantenenergie, die der Differenz zweier Energieniveaus des Systems entspricht, Übergänge vom oberen zum unteren Niveau im angeregten Atom erzwungen. Die so emittierten Lichtquanten haben die gleiche Frequenz, Phase, Richtung und Polarisation wie die auslösende Welle. Es entsteht demzufolge ein Strahl, der sich durch folgende Eigenschaften auszeichnet:

- Er besteht aus elektromagnetischen Wellen mit einer genau definierten, laserspezifischen Wellenlänge. Diese Strahlung ist monochromatisch (ERHARDT et al., 1993).
- Es herrscht zeitliche und räumliche Kohärenz (gleiche Phasenbeziehungen).
- Es ist eine geringe Divergenz vorhanden. Das bedeutet, dass die Strahlen nahezu parallel verlaufen. GILDE (1992) gibt für den Nd:YAG – Laser eine Winkeldivergenz von 1×10^{-3} rad an.

Eng verknüpft mit der geringen Strahlauflaufweitung ist die gute Fokussierbarkeit der Laserstrahlung auf extrem kleine Flächen. Damit verbunden sind die auf sehr eng begrenzte Bereiche zu konzentrierenden hohen Leistungsdichten, die zur Materialbearbeitung notwendig sind.

Technisch wird der Vorgang der Laserstrahlerzeugung mit den drei Hauptbestandteilen eines Lasergerätes umgesetzt:

- dem laseraktiven Material,
- den Pumplampen zur Erzeugung einer Besetzungsinvolution und
- dem Resonator.

Hinzu kommen Strahlführungs-, -fokussierungs- und –formungssysteme.

Als aktives Lasermaterial wird im Falle des Nd:YAG-Lasers das zu den Seltenerdmetallen oder Lanthaniden zählende Neodym genutzt. In Form seiner Ionen (Nd^{3+}) wird es in ein Yttrium–Aluminium(Oxid)–Granat(YAG)-Einkristall mit einem Gehalt von 0,5 – 3,5 Gewichtsprozent dotiert (ERHARDT et al., 1993; GILDE, 1992).

Die Erzeugung einer Besetzungsinvolution erfolgt beim Nd:YAG-Laser durch das sogenannte optische Pumpen. Als Pumplampen werden für gepulste Laser Xenon-

Blitzlampen genutzt, für Laser im Dauerstrichbetrieb kommen Hochdruck-Krypton-Lampen zum Einsatz (GILDE, 1992). Das von diesen Lampen auf den Laserstab einwirkende Strahlungsfeld führt zu einer Anregung der Neodym-Ionen. Dabei springen die Elektronen der äußeren Atomhülle vom Grundniveau auf ein höheres Energieniveau, von welchem sie unter Abgabe von Wärme auf das sogenannte obere Laserniveau zurückfallen. Auf diesem verbleiben sie vorerst. Das nächstfolgende Energieniveau ist das untere Laserniveau, welches schnell entleert wird. Ist also das obere Laserniveau stärker besetzt als das energetisch niedrigere untere Laserniveau, liegt eine Besetzungsinvolution vor. Wird während der Verweilzeit im oberen Laserniveau eine Strahlung eingeleitet, deren Energie der Energiedifferenz dieser beiden Laserniveaus entspricht, wird die Rückkehr der Elektronen auf das untere Laserniveau und damit die Abgabe von Energie in Form von Photonen – also Strahlung – induziert. Dazu dient das erste parallel zur Laserstabachse spontan emittierte Photon. Dieses trifft nach kurzer Entfernung auf weitere angeregte Ionen und induziert die Photonenemission, welche sich lawinenartig fortsetzt. Das Laserlicht entsteht also beim Übergang vom oberen zum unteren Laserniveau.

Eine weitere Voraussetzung zur Laserstrahlerzeugung besteht in einer Rückkopplung der Strahlung und der Auswahl eines schmalen Frequenzbandes (KNEUBÜHL und SIGRIST, 1989). Diese Bedingung wird durch den sogenannten optischen Resonator erfüllt. Durch Anordnung zweier Spiegel an den Enden des Laserstabes, deren Entfernung L ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge ist, erzeugt man im Laserstab eine stehende Welle mit einer bestimmten Länge, die sich durch vielfache Durchgänge durch das Lasermaterial selbst verstärkt. Die Auskopplung des erzeugten Laserstrahls erfolgt durch einen teildurchlässigen Spiegel des Resonators. Dieser prinzipielle Aufbau eines Nd:YAG-Lasers ist in der Abbildung 1 dargestellt.

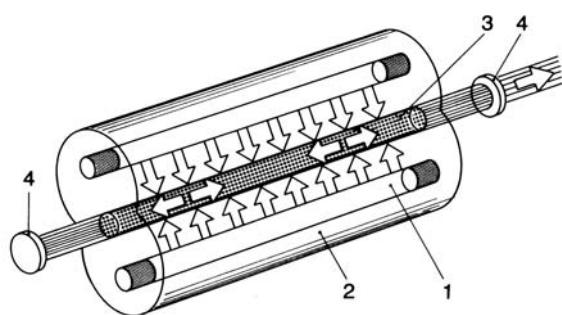


Abb. 1: Aufbau eines Nd:YAG-Lasers

(Quelle: Erhardt et al. 1993, S.26)

- 1 Blitzlampe zur Erzeugung des Pumplichtes
- 2 Reflektor für Pumplicht
- 3 aktives Lasermaterial (Nd:YAG)
- 4 Resonator (Rückkopplungseinheit), bestehend aus einem undurchlässigen und einem teildurchlässigen Spiegel

Da die Leistungsdichte des Laserstrahls am Ausgang der Strahlquelle (bis zu 10^3 W/cm 2) zur thermischen Materialbearbeitung nicht ausreicht, muss der Laserstrahl vor dem Auftreffen auf der Materialoberfläche durch eine Fokussieroptik gebündelt werden (ERHARDT et al., 1993).

Allerdings ist die Intensität der Laserstrahlung im Strahlenquerschnitt nicht konstant. Die Intensitätsverteilung wird als Mode (TEM = Transversaler Elektromagnetischer Mode) bezeichnet und vor allem durch den Aufbau des Lasers - insbesondere durch den optischen Resonator - sowie durch die Art des Lasermediums bestimmt. Ein Beispiel für die Intensitätsverteilung der Strahlung eines Nd:YAG-Lasers zeigt die folgende Abbildung.

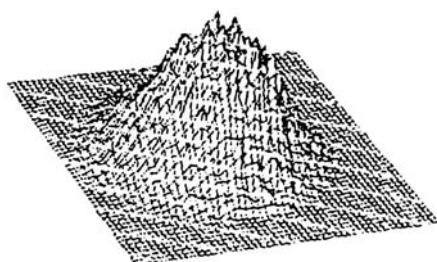


Abb. 2: Intensitätsverteilung (Multimode) eines Nd:YAG-Lasers, gemessen im Fokus
Quelle: ERHARDT et al. 1993, S.63

Nach der Art des Lasermediums unterscheidet man neben den Festkörperlasern (z.B.: Nd:YAG-Laser) Gaslaser, Farbstofflaser und Halbleiterlaser. In der Medizin kommen neben dem oben genannten Festkörperlaser vor allem Gaslaser zum Einsatz. So kann man zum Beispiel mit einem CO₂-Laser in der Neurochirurgie blutungsfrei schneiden. Argon-Laser, Excimer-Laser und Erbium-Laser werden in der Augenheilkunde genutzt (EICHLER und EICHLER, 1995). In der Zahnheilkunde gab es viele Versuche, durch Laserstrahlung herkömmliche Behandlungsmethoden zu ersetzen oder zu ergänzen. Wissenschaftlich anerkannt ist die Nutzung des CO₂-Lasers zur Entfernung benigner Schleimhauttumoren. Zur Entfernung von Fremdkörperimplantationen (z.B. Tätowierungen) findet der Argon-Laser im Gesichtsbereich Anwendung. Für die Präparation von Zahnhartgewebe und die Entfernung kariösen Dentins konnte jedoch noch kein Lasersystem entwickelt werden, das den konventionellen Behandlungsmethoden überlegen ist. Zur Abtragung von Gingivahyperplasien werden in der Parodontologie CO₂- und Nd:YAG-Laser genutzt (FRENTZEN und KOORT, 1991).

Die Wirkung der hochenergetischen Laserstrahlung auf Festkörper wird im folgenden Kapitel an Hand des Schmelzens und Schweißens von Metallen dargestellt.

2.2 Die Wirkung des Lasers auf Materie – Schmelzen und Schweißen

Die unter großem technischen Aufwand erzeugte Laserstrahlung steht nur zu einem geringen Teil für die Materialbearbeitung zur Verfügung. Der überwiegende Anteil geht durch Reflexion, Wärmeleitung und Konvektion verloren. So kann nach DILTHEY (1994) bei Stahlwerkstoffen die Reflexion bis zu 95 % betragen. Entscheidend für die Materialbearbeitung ist aber die Absorption der einwirkenden Energie. Sie ist abhängig vom Werkstoff, von der Oberflächentemperatur, von der Wellenlänge des auftreffenden Lichtes und vom Oberflächenzustand. Der Absorptionsprozess verläuft nach DORN et al. (1992) bei Metallen in einer Schichtdicke von 0,01 bis 0,1 μm und wird durch die Wechselwirkung mit den freien Elektronen des Metalls bestimmt. Bei niedrigen Laserstrahlintensitäten wird die Vereinigung zweier Werkstücke durch das sogenannte Wärmeleitungsschweißen bewirkt. Dabei erfolgt die Erwärmung der Fügestelle von der Oberfläche her. Es findet eine Schmelzbadbewegung statt, welche von der Oberfläche ausgeht und eine Wirbelstruktur im Inneren der Schmelzzone zur Folge hat. Diese Prozesse sind zurückzuführen auf die unterschiedliche Temperaturverteilung im Material und die Temperaturabhängigkeit der Oberflächenspannung. Infolgedessen entstehen Scherspannungen, die eine unsymmetrische Bewegung der Schmelze zur Folge haben und somit auch das optische Bild der Schweißnaht beeinflussen. Während sich im Zentrum aufgrund der Druckabsenkung eine Vertiefung bildet, entsteht im Randbereich durch Abbremsen der Schmelze eine Aufwölbung (BEYER, 1995).

Oberhalb einer bestimmten „kritischen Intensität“ ($I \geq 10^6 \text{ W/cm}^2$) ist eine sprunghafte Zunahme der Absorption auf bis zu 80 % zu verzeichnen, man spricht auch von anomaler Absorption. Diese wird außer auf eine entstehende Plasmawolke vor allem auf die Ausbildung einer Dampfkapillare - auch Stichloch genannt - zurückgeführt (DORN et al. 1992). Während beim Wärmeleitungsschweißen die Erhitzung und damit das Aufschmelzen des Metalls allein von der Oberfläche her durch Wärmeleitung in das Werkstück erfolgt, kommt es bei hohen Laserstrahlintensitäten zu einer lokalen Aufheizung des Metalls bis auf die Verdampfungstemperatur. Infolgedessen kann der Laserstrahl ein feines Loch in das Werkstück bohren. Es bildet sich die bereits erwähnte Dampfkapillare, die durch den ständig entweichenden Metalldampf für die Dauer der Strahlungseinwirkung erhalten bleibt, und durch welche der Laserstrahl tief in das Werkstück eindringen kann. Dieser Vorgang ist die Grundlage des Tiefschweißens. Die Strahlung wird an den Kapillarwänden reflektiert und von diesen absorbiert. Der Energietransport erfolgt also von der Kapillarwand im Inneren des Werkstücks aus und nicht von der Oberfläche her. Aus diesem Prozess lässt sich auch

die Möglichkeit des Laserstrahlbohrens ableiten. Ungewollten Bohrungen und damit Schädigungen des Werkstückes können beim Laserschweißen durch eine ungünstige Parameterwahl und demzufolge durch zu hohe Laserstrahlintensitäten verursacht werden.

In den beiden unterschiedlichen Schweißarten liegen die verschiedenen Schweißnahtgeometrien begründet. Während mit dem Wärmeleitungsschweißen breitere und flachere Schweißnähte mit einem Tiefen-Breiten-Verhältnis von 0,5 bis 1 erzielt werden, kann man in der industriellen Fertigung mit dem Tiefschweißen Nähte erzeugen, deren Schweißnahtquotient größer als zehn ist (BEYER, 1995).

2. 3 Das Laserschweißen in der Zahntechnik

Nachdem der Laser zum ersten Mal 1960 von MAIMAN realisiert worden war (GILDE, 1994), berichteten 1964 FAIRBANKS et al. über die Möglichkeit des „Schmelzschweißens“ von Metallen. GORDON und SMITH entwickelten bald darauf ein Laserschweißgerät, welches in der Zahntechnik angewandt werden konnte und käuflich zu erwerben war (LENZ, 1974).

In den folgenden Jahren wurde das Laserschweißen zunächst für die prothetische Zahntechnik genutzt und eine Vielzahl der verwendeten Gusslegierungen auf ihre Schweißeignung und ihr Schweißverhalten untersucht. Erst deutlich später entdeckte man die Anwendungsmöglichkeit dieser Fügemethode auch für die kieferorthopädische Technik. Das Bild einer geschweißten Crozat-Apparatur zeigt die Abbildung 3.



Abb. 3: Eine Crozat-Apparatur als Beispiel für die Anwendung des Laserschweißens in der kieferorthopädischen Technik, hergestellt von ZTM F. Schmeil, Universitätspoliklinik für Kieferorthopädie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

2.3.1 Das Laserschweißen in der kieferorthopädischen Technik

Die Zahl der Veröffentlichungen zum Laserschweißen kieferorthopädisch genutzter Drähte ist gering, obwohl die Schweißbarkeit verschiedener Edelstahldrähte aufgrund von Untersuchungen und durch die tägliche praktische Anwendung in der industriellen Fertigung außer Frage steht. So haben zum Beispiel DORN et al. (1992) sowie DILTHEY (1994, 1995) die austenitischen Chrom-Nickel-Stähle, zu denen auch Remanium® (Dentaurum, Ispringen, D) zählt, als schweißbare Werkstoffe aufgeführt. LAATZ (1997) untersuchte die Laserschweißbarkeit des nickelfreien Stahldrahtes Menzanium® (Scheu-Dental, Iserlohn, D) im Vergleich zu dem konventionellen Chrom-Nickel-Stahldraht Remanium® anhand der Gefügeausbildung sowie der Zugfestigkeit und verglich die Ergebnisse mit denen widerstandsgeschweißter und gelöteter Proben. Er lagerte die Drähte gekreuzt übereinander und richtete den Laserstrahl mittig auf den oberen Draht. Die höchsten Zugfestigkeitswerte wurden für beide Legierungen bei den Lötverbindungen bestimmt, während die lasergeschweißten Verbindungen die geringsten Zugfestigkeiten aufwiesen. Andererseits empfehlen VAN BENTHEM und LAATZ (1997), nach Möglichkeit auf das Löten zu verzichten, da durch die Zufuhr von Lotmaterial die Biokompatibilität der Verbindung negativ verändert wird.

Zu gegenteiligen Ergebnissen kamen HOFMANN und LINDIGKEIT (1999a). Sie prüften unterschiedliche Drahtverbindungen für kieferorthopädische Apparaturen auf ihre Festigkeit. Getestet wurden Drähte des Durchmessers 0,7 mm aus folgenden Legierungen: Remanium® (Edelstahl in den Qualitäten hart und federhart), Remaloy® (Kobalt-Basis-Legierung) sowie Noninium® (nickelfreier Edelstahldraht, ebenfalls in den Qualitäten hart und federhart; alle drei Legierungen: Dentaurum, Ispringen, D). Die Fügestelle variierten sie wie folgt:

- Stoß an Stoß ohne Schweißzusatzmaterial,
- Stoß an Stoß und Auffüllen des Nahtefalls mit Schweißzusatzmaterial,
- Stoß an Stoß und Aufdoppeln des Drahtes durch paralleles Anschweißen eines artgleichen Drahtes (4 mm lang) mittig zur primären Schweißstelle.

In dieser Reihenfolge erzielten sie bei allen Drahtmaterialien eine Zunahme der Zugfestigkeit. Für letztgenannte Nahtform bestimmten sie in Abhängigkeit von der Legierung Werte zwischen 70 % (Remanium®, federhart) und 90 % (Noninium®) der Zugfestigkeit des Ausgangsmaterials. Sowohl die beiden erstgenannten Nahtkonfigurationen als auch das Löten mit Silberlot konnten dieses Niveau nicht erreichen.

PRESCHER (2002) untersuchte Chrom-Nickel-Drähte verschiedener Hersteller und den Chrom-Mangan-Draht Menzanium® auf die Kerbschlagzugfestigkeit von lediglich gebogenen, gelöteten und lasergeschweißten Verbindungen. Zur Differenzierung der unterschiedlichen Fügetechniken, Werkstoffe, Durchmesser und Materialgüten wählte er Geometrien mit einer Abwinklung von 90°. Die Proben wurden nach provoziertem Bruch Stoß-an-Stoß mit artgleichem Zusatzmaterial gefügt. Bei den Chrom-Nickel-Stählen erzielte er mit den gebogenen Proben die höchsten Festigkeiten. Die lasergeschweißten Verbindungen erreichten mit 67 % (Durchmesser 0,8 mm) bzw. 72 % (Durchmesser 0,7 mm) höhere Festigkeiten als die entsprechenden Lötungen (52 % bzw. 58 %). Der Chrom-Mangan-Stahl besaß zwar im gebogenen Zustand bei dem Durchmesser 0,8 mm eine überragende Festigkeit, reagierte aber auf jede Wärmeeinwirkung (Laserschweißen, Löten) mit erheblichem Stabilitätsverlust. Die Festigkeiten wurden auf 35 % bzw. 32 % der gebogenen Proben reduziert. Zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften in Abhängigkeit vom Biegegrad stellte PRESCHER Proben der Sorte Remanium® in den Güten hart und federhart mit folgenden Abwinklungen her: 60°, 90° und 120°. Bei dem Durchmesser 0,8 mm und Abwinklungen von 60° und 90° wiesen die Drähte der Güte hart höhere Festigkeiten auf als die federharten Drähte. Dies trat bei den Drähten mit dem Durchmesser 0,7 mm nur bei einer Abwinklung von 60° auf. Er erklärte diese Unterschiede mit der unterschiedlichen Ausgangsfestigkeit und der geringeren Kaltverfestigung der harten Drähte. Diese besitzen eine gewisse Reserve für eine weitere Kaltverfestigung. Des Weiteren wird der 0,8-mm-Draht im Bereich der Biegestelle am Außendurchmesser stärker verformt als am Innendurchmesser. Wird eine gewisse Kaltverformung überschritten, kann es zur Versprödung oder Mikrorissbildung kommen.

OSBURG (2002) nutzte für ihre Untersuchungen die gleichen Drahtsorten wie PRESCHER. Sie untersuchte an 90° abgewinkelten Proben des Durchmessers 0,8 mm die Korrosion und die Kerbschlagzugfestigkeit nach siebentägiger Lagerung in zwei verschiedenen Korrosionsmedien. Dabei erzielte sie mit den gebogenen Ausgangsdrähten höhere Festigkeiten als mit den lasergeschweißten Proben. Deutlich schlechtere Ergebnisse wiesen die gelöteten Proben auf. Die Festigkeiten der gelöteten Drähte zeigten vor und nach Elektrolyteinfluss die größten Unterschiede. Des Weiteren bewirkte die Lagerung im Korrosionsmedium gravierende Veränderungen an der Oberfläche. Neben Krustenbildungen durch Ablagerungen, Poren und Risse stellte OSBURG bei einigen Drähten auch Brüche am vorher glatten Übergang zwischen Lot und Drahtmaterial fest. Bei den gebogenen und lasergeschweißten Proben konnte sie keine Unterschiede feststellen. Die Nickelionenabgabe war insgesamt gering, am höchsten war sie erwartungsgemäß bei den Chrom-Nickel-Stählen. Die

Korrosionslösungen der gelöteten Proben zeigten hohe Ionenmengen an Kupfer und Zink. Auch für andere Metalle ergaben sich größere Mengen als bei den geschweißten, gebogenen und unbehandelten Drähten.

Eine ähnliche Untersuchung führte LÖBLEIN (2002) an Remanium®-Drähten durch. Er prüfte anhand dynamischer Wechsel- und statischer Zugbelastungen die Stabilität gelöteter und lasergeschweißter Verbindungen, von denen ein Teil zuvor korrosiven Medien ausgesetzt worden ist. Er wählte einen Überlappstoß mit einer Länge von fünf mm. Dafür wurde zunächst ein Draht in Form eines „L“ gebogen, dessen kleiner Schenkel mittig auf den zweiten Draht gelasert worden ist. Die lasergeschweißten Verbindungen wiesen mit Ausnahme der dynamischen Wechselbelastung ohne Einwirkung einer Korrosionslösung statistisch signifikant bessere Werte auf als die gelöteten Verbindungen.

Die Untersuchungen von ÖHLSCHLÄGER (1986) befassten sich nicht mit kieferorthopädischen Materialien, sondern mit industriell verarbeiteten Drähten. Der Autor bestimmte bei Draht-Schweiß-Verbindungen im Überlappstoß die höchsten Tragfähigkeiten mit geringen Schwankungen. Bei Silberdrähten mit 0,5 mm Durchmesser wurden 87 % der Drahtbruchkraft als Höchstwert ermittelt. Bei Verwendung des Kreuzungsstoßes konnten jedoch nur ca. 50 % der Drahtbruchkraft erzielt werden.

Wie bereits erwähnt, wurden zu den dentalen Gusslegierungen deutlich mehr Untersuchungen durchgeführt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können jedoch nicht auf Drahtverbindungen übertragen werden. Dies trifft vor allem für parallel gelagerte Drähte zu, wie sie in der hier vorliegenden Arbeit verschweißt wurden. Dieser Sachverhalt ist durch mehrere Faktoren begründet, die im Folgenden dargestellt werden sollen.

In den bisher veröffentlichten Untersuchungen hatte man gegossene Legierungsplatten verwendet, deren Größe sich von Arbeit zu Arbeit unterschied. Trotz dieser Abweichungen haben viele der Untersuchungen eines gemeinsam: Die als Plättchen gegossenen Legierungen werden im Stumpfstoß gefügt. Sie haben bei exakter Positionierung einen flächigen Kontakt im Schweißnahtbereich (z.B.: FREYTAG, 1993; HEMME, 1989). Im Gegensatz dazu berühren sich die Drähte im Parallelstoß nur punktförmig. Der Vorteil überlappt geschweißter Drähte liegt nach DORN et al. (1992) in der guten Energieumsetzung, welche nach ihren Angaben aus der Vielfachreflexion zwischen den parallelen Drähten resultiert. Man nennt diese Konstellation auch Strahlenfalle. Sie bewirkt eine starke Erhöhung der Anfangsabsorption. Schematisch ist dieser Sachverhalt in der Abbildung 4 dargestellt.

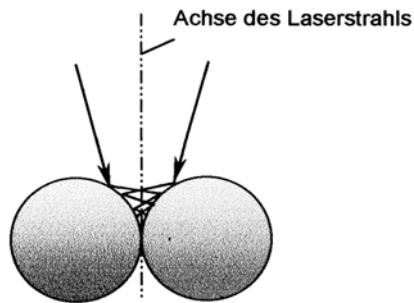


Abb. 4: Das Prinzip einer Strahlenfalle.

Die konvexen Flächen zweier parallel gelagerter Drähte führen zu einer Mehrfachreflexion des Laserstrahles zwischen den Drähten (modifiziert nach DORN et al., 1992).

Ein weiterer Unterschied zum Schweißen von Platinen besteht bei Drähten in der verminderten Wärmeabfuhr durch den umliegenden Werkstoff, da der Querschnitt des Drahtes und demzufolge das Volumen zur Wärmeabfuhr deutlich kleiner ist. Es kann also weniger Energie an das umgebende Material abgeführt werden. Vielmehr gewinnt der Energietransport durch Wärmestrahlung und Konvektion an Bedeutung. Diese Tendenz wird mit abnehmendem Drahtquerschnitt noch verstärkt, da sich das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen vergrößert.

In diesem Zusammenhang muss auch die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der Metalle erwähnt werden, wobei die Temperaturleitzahl der wesentlichste Werkstoffparameter zur Charakterisierung der Wärmeabfuhr ist. Während zum Beispiel Gold eine Temperaturleitzahl von $1,18 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ aufweist, besitzen Chrom, Eisen und Nickel Temperaturleitzahlen zwischen 0,20 und $0,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Nach DORN et al. (1992) ermöglicht eine hohe Temperaturleitzahl eine höhere Aufschmelztiefe, sofern das Absorptionsverhalten wie zum Beispiel bei Kupfer nicht zu gering ist. Nach Aussagen der Autoren lässt sich Nickel einschließlich seiner Legierungen gut schweißen. „Es speichert einen hohen Betrag der eingebrachten Energie, da es eine hohe Wärmekapazität pro Volumen hat und ermöglicht damit Ausgleichsvorgänge im Material“ (DORN et al., 1992, S. 86). Dies verringert einerseits Wärmespannungen, könnte aber andererseits zu einer grobkörnigeren Rekristallisation führen.

2.3.2 Die Festigkeit lasergeschweißter Verbindungen im Vergleich zum Löten

Um die Einsatzmöglichkeit des Laserstrahlschweißens in der dentalen Fügetechnologie beurteilen zu können, standen zunächst Vergleiche des Laserschweißens mit dem konventionellen Löten im Mittelpunkt des Interesses.

Schon 1974 hob LENZ die Zeitersparnis und Exaktheit des Laserschweißens im Vergleich zum Löten hervor. Des Weiteren wies er auf die Möglichkeit hin, Schweißungen an verblendeten Kronen durchführen zu können, ohne die Kunststoff- oder Keramikverblendung in Mitleidenschaft zu ziehen.

Bezüglich der Exaktheit kam ESKE (1975) zu einem gegenteiligen Ergebnis. Er untersuchte die Passgenauigkeit gegossener Inlays aus Degulor M® und Degulor C® (Degussa Dental, Hanau, D), die nach herkömmlicher Lötmethode und mittels Laserstrahl verbunden worden waren. Als Maß für die Passgenauigkeit nutzte der Autor die Spaltbreite zwischen Inlay und Modellstumpf. Dabei ergab die Lötmethode eine Zunahme der Spaltbreite um 56,5 %, während nach der Laserschweißung ein um 218 % vergrößerter Spalt bestimmt wurde. Er wies darauf hin, dass beim Löten die Temperaturbedingungen günstiger wären, da nur das Lot zum Schmelzen gebracht werden müsse und nicht die beiden zu verbindenden Enden der Inlays. Des Weiteren sei die Schmelzzone bei einer Schweißung an der Oberfläche breiter als in der Tiefe, so dass dort der Anteil der Schrumpfung höher ist. Die freien Enden der geschweißten Teile verbiegen sich infolgedessen zu der Seite, aus welcher der Laserstrahl einwirkt. Die Gegenseite wurde in dieser Untersuchung nicht mit dem Laser bearbeitet, so dass die Kontraktion der Schmelze während des Abkühlens und Erstarrens nicht ausgeglichen werden konnte.

DIELERT (1978/79) befasste sich zunächst mit einem anderen Schweißverfahren, dem Mikroplasmaschweißen. Er fügte zwei Dentalgoldlegierungen und eine Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung jeweils in artgleicher Kombination und erzielte damit hinsichtlich der Festigkeit und der Korrosionsbeständigkeit günstigere Ergebnisse als mit der herkömmlichen Lötmethode.

1987 verglichen DIELERT und KASENBACHER das Löten, das Mikroplasmaschweißen und das Laserschweißen mittels metallographischer Untersuchungen an der Legierungspaarung Wironium® (Bego, Bremen, D) / Degulor M®. Beide Schweißverfahren waren dem Löten überlegen. Durch das Laserschweißen konnten sie eine Vereinigung der Werkstoffpaarung erreichen, die sich im Vergleich zum Mikroplasmaschweißen durch ihre geringe Nahtbreite und eine mit metallographischen Verfahren nicht nachweisbare Wärmeeinflusszone auszeichnete. Die Platinen waren vollständig durchgeschweißt. Über die erreichte Zugfestigkeit machten sie keine Aussagen.

Auch GEIS-GERSTORFER et al. (1990) untersuchten die drei Fügemethoden. Als Prüfmaterial verwandten sie gegossenes Titan und weitere Gusslegierungen. Im Gegensatz zu oben aufgeführten Autoren erreichten sie mit dem Löten höhere Festigkeiten als mit dem Plasmaschweißen. Die höchsten Werte erzielten sie mit den

lasergeschweißten Verbindungen, die Festigkeit der Prüfkörper im Ausgangszustand konnte jedoch nicht erreicht werden.

Bezüglich der Festigkeit lasergeschweißten Titans sind die Ergebnisse von KAPPERT (1991) mit den Untersuchungsergebnissen von GEIS-GERSTORFER et. al. zu vergleichen. Bei einigen Legierungen kam er zu anderen Resultaten. Er hob hervor, dass eine gute Lötung durchaus hinsichtlich der Festigkeit mithalten kann. Das Laserschweißen einer Kobalt-Chrom-Legierung mit reduzierten Gold- oder mit Palladium-Kupfer-Legierungen führte sogar zu deutlich schlechteren Ergebnissen als das Löten und das Plasmaschweißen. Der Vorteil der Schweißverfahren bezüglich der besseren Korrosionsbeständigkeit bleibt aber auch für ihn unbestritten.

VAN BENTHEM und VAHL (1978 a, b und c, 1979, 1980, 1981, 1984, 1992) führten in verschiedenen Arbeitsgruppen eine Reihe von Versuchen zum Einsatz des Lasers in der dentalen Technologie durch. Bezüglich der Zugfestigkeit hoben sie die deutlich höhere Qualität der lasergeschweißten Verbindungen hervor, wobei sich die continuous-wave-Schweißung (d.h. mittels kontinuierlicher, nichtgepulster Strahlung) als besonders stabil herausstellte. Für den Einsatz in der Zahntechnik empfahl VAN BENTHEM 1992 dennoch den Impulsbetrieb. Beide Autoren wiesen aber darauf hin, dass bei ungünstiger Legierungszusammensetzung durch den Anteil leichtverdampfender Elemente eine Versprödung des Metalls auftreten könne. In diesem Fall besteht die Gefahr, dass die Zugfestigkeit der entstehenden Verbindung auf das Niveau einer Lötung herabsinkt (VAN BENTHEM und VAHL, 1978 a).

BEHRENS (1990) untersuchte nach der DIN 50125 die Güte lasergeschweißter Verbindungen an Titan, den Kobalt-Chrom-Aufbrennlegierungen Remanium® 2000 und Remanium® GM 800 sowie der Nickel-Chrom-Aufbrennlegierung Remanium® CS. Dabei bestimmte sie in Abhängigkeit von der Legierungsart sehr unterschiedliche Zugfestigkeiten. Während für Titan eine Zugfestigkeit von nahezu 100 % des Ausgangsmaterials erreicht wurde, ist bei der Legierung Remanium® GM 800 lediglich ein Wert von 57,6 % erzielt worden. Die ermittelten Festigkeiten für die beiden anderen Legierungen lagen zwischen diesen beiden Werten.

HOFMANN (1992 a) verglich die lasergeschweißten Verbindungen der Legierungen Degulor M®, Remanium® GM700 sowie die Kombination beider mit den gelöteten Verbindungen der gleichen Art. Dabei stellte er keine signifikanten Unterschiede zwischen den jeweils korrespondierenden Löt- und Schweißproben fest. In Bezug auf das optische Erscheinungsbild, die Passgenauigkeit sowie auf das Verhältnis von Aufwand und Risiko hob er aber die Vorteile des Laserschweißens gegenüber dem Löten hervor. Im zweiten Teil seiner Veröffentlichung (1992 b) ging er kurz auf einige

Anwendungsbeispiele und die qualitätsbeeinflussende Parameterkombination aus Gesamtenergiedichte, Fleckdurchmesser, Eindringtiefe und Einwirkdauer ein.

Bei den von HOFFMANN (1996) durchgeführten Zugfestigkeitsprüfungen an verschiedenen Legierungen waren sämtliche Laserverbindungen stabiler als die dazugehörigen Lötungen. Des Weiteren zeigte er die vielfältigen Möglichkeiten der Laseranwendung im zahntechnischen Laboratorium auf und ging dabei sowohl auf die Neuanfertigung als auch auf die Fehlervermeidung und -behebung bei komplexen Arbeiten ein.

WEGENER (2002) untersuchte an acht edelmetallhaltigen Legierungen mit Hilfe der Biege-Scherprüfung, ob das Laserschweißen die Keramikhaftfestigkeit beeinflusst. In der Mehrzahl der Fälle hatte das Laserschweißen keinen Einfluss auf die Keramikhaftfestigkeit. Er empfahl, gelaserte Legierungsoberflächen vor dem Verblenden mit einer Hartmetallfräse zu bearbeiten. Die Keramikhaftfestigkeiten lasergeschweißter Versuchsgruppen waren nicht korrosionsanfälliger als die ungelaserten Vergleichsgruppen.

Zwischen 1989 und 1992 erschienen verschiedene Veröffentlichungen (DOBBERSTEIN, 1990; FISCHER, 1990; MOHR, 1991; SCHWARZ, 1992) zum Laserschweißen der in der ehemaligen DDR gängigen Legierungen, der Kobalt-Basislegierung Gisadent KCM 83, der Nickel-Basislegierungen Gisadent NCA (beide VEB Feingusswerk Lobenstein, DDR) und Gisadent NCS-1 sowie der Silber-Palladium-Legierung Sipal 306 (beide VEB Bergbau- und Hüttenkombinat Freiberg, DDR). Nach den Ergebnissen von DOBBERSTEIN (1990) waren die Festigkeitswerte der lasergeschweißten Proben aller identischen Legierungskombinationen denen gelöteter Verbindungen überlegen. Das Gefüge der Schweißnähte stellte sich feinkörniger dar als das der Ausgangsgefüge, worauf die wesentlich geringere Korrosion der Schweißnähte im Vergleich zu den Lotnähten zurückgeführt wurde. Demgegenüber konnte kein einheitliches Härtungsverhalten nachgewiesen werden, was die materialspezifisch determinierte Wirkung der Laserstrahlung verdeutlichte.

Ein ähnliches Ergebnis erhielt FISCHER (1990) für die Legierung Gisadent KCM 83 fest. Mit den lasergeschweißten Verbindungen erzielte er um bis zu 50 % höhere Zug- und bis zu 21 % höhere Biegefestigkeiten als mit den entsprechenden Lötverbindungen. Die Prüfung der Mikrohärte nach VICKERS zeigte eine Aufhärtung in beiden Fügenähten, wobei der Wert in der Laserschweißnaht um 60 % höher war als derjenige der Lotnaht.

MOHR (1991) und SCHWARZ (1992) untersuchten jeweils einen Teil der oben genannten Legierungen auf ihre Korrosionsanfälligkeit. Trotz unterschiedlicher Verfahren stellten beide Autoren eine höhere Korrosionsresistenz der

lasergeschweißten Verbindungen im Vergleich zu den Lötverbindungen fest. SCHWARZ konnte zeigen, dass das Ausmaß der Bildung einer Übergangszone zwischen Schweißnaht und Ausgangsmaterial von der Legierungsart und ihrer Zusammensetzung abhängt. In lichtmikroskopischen Untersuchungen zeigte sich diese Wärmeeinflusszone am korrosionsanfälligsten.

SCHLIEMANN (1989) untersuchte neben den Gefügestrukturen der Lötverbindungen von Gisadent KCM 83, Gisadent NCA und V₂A-Stahl auch die Fügezonen der WIG-geschweißten Verbindungen dieser Legierungen. Als Zusatzmaterial wurden Chrom-Kobalt-Löt- und Schweißstäbchen (Krupp Widia-Fabrik, Essen, D) eingesetzt. Bei der Verwendung von V₂A-Stahl stellte sich die Fügezone der Schweißungen eher als Lotbindung dar. Eine Wärmeeinflusszone war nachzuweisen. Im Gegensatz dazu zeigten sich bei den Schweißungen der Gusslegierungen homogene, dendritisch erstarrte Gefüge in der Schweißzone.

2.3.3 Der Einfluss der Prozessparameter auf die Qualität der Laserverbindung

Neben dem Vergleich des Laserschweißens mit anderen Fügemethoden haben verschiedene Autoren auch Untersuchungen zu den Faktoren durchgeführt, welche die Qualität der entstehenden Laserschweißverbindung beeinflussen könnten. Dabei standen die Impulsenergie, die Impulslänge, die Größe des Fokus und der Einsatz eines Schutzgases im Mittelpunkt des Interesses. Um den Einfluss der einzelnen Parameter einschätzen zu können, wurden unter anderem die Schweißnahtgeometrie und die erzielte Zugfestigkeit untersucht.

Einen linearen Zusammenhang zwischen der Impulsenergie und der Schweißnahtbreite und -tiefe konnten zum Beispiel DOBBERSTEIN (1990), FISCHER (1990) sowie VAHL et al. (1984) nachweisen. Diese Erkenntnisse wurden durch die Feststellung von BEHRENS (1990) bekräftigt, die einen Zusammenhang zwischen der Erhöhung der Spannung und der Zunahme der Zugfestigkeit beobachtete. Allerdings bemerkten VAHL et al. (1984) bei zu hohen Pulsenergien eine Reduzierung der Zugfestigkeit. Sie führten dies - ebenso wie VAN BENTHEM (1992, 1994) - auf die zunehmende Wahrscheinlichkeit der Bildung von Lunkern und Porositäten zurück. So legten VAN BENTHEM und VAHL schon 1978 (a, b) dar, dass die Impulsenergie nicht zu hoch gewählt werden dürfe, um Verdampfungen von Legierungsbestandteilen, die Entstehung eines porösen Schweißgutes und die Erzeugung von Bohrungen zu verhindern. 1978 wiesen sie zusammen mit PREDEL nach, dass die verdampfte

Masse an Metall proportional zur Pulsenegie ist, sofern nur eine reine Verdampfung auftritt. 1981 stellten VAHL und VAN BENTHEM die Übereinstimmung des maximalen Formfaktors (Schweißnahttiefe/Schweißnahtbreite) und der maximalen Zugfestigkeit bei gleicher Pulsenegie fest.

Mit zunehmender Impulslänge beobachtete DOBBERSTEIN (1990) eine Vergrößerung sowohl der Laserspurbreite als auch der Laserspurtiefe. Ebenso konnte BEHRENS (1990) eine Zunahme der Zugfestigkeit verzeichnen. VAN BENTHEM (1992) empfahl, unter Berücksichtigung der Legierungszusammensetzung und der geometrischen Verhältnisse der Fügestelle mit der größtmöglichen Impulslänge zu schweißen.

TRAUTMANN (2001) konnte bei der Untersuchung von Spannung, Impulsdauer sowie Länge der zu fügenden Körper kaum einen Einfluss auf den Verzug der geschweißten Probekörper feststellen. Eine erfolgreiche Anwendung ist nach seiner Aussage abhängig von der Erfahrung des Anwenders und der individuellen Anpassung an die jeweiligen Gegebenheiten der Schweißaufgabe.

VAN BENTHEM und LAATZ (1997) stellten die Impulslänge und die Impulsenegie als entscheidende Einflussfaktoren beim Fügen von Drähten aus Remanium® und Menzanium® heraus. Des Weiteren sollte der Fleckdurchmesser des Laserstrahles mindestens das 1,2 - 1,5fache des Drahtdurchmessers betragen. Nur so könne man bei der von ihnen gewählten Stoßform eine hinreichende Aufschmelzung beider Drähte gewährleisten. Ebenso führt eine relative Fokuslage oberhalb der Schweißebene zu einem großflächigen Aufschmelzen des oberen und damit auch zu einer hinreichenden Benetzung des unteren Drahtes.

Die Impulsfolgefrequenz bezeichneten VAN BENTHEM und VAHL (1980) als einen entscheidenden Einflussfaktor auf Härte und Zugfestigkeit. Laut einer späteren Veröffentlichung (1992) könne dieser Parameter in einem Bereich von 1 - 20 Hz variiert werden, ohne eine signifikante Wirkung auf die Zugfestigkeit lasergeschweißter Dentallegierungen auszuüben. Zur Wahl der optimalen Schweißparameter empfehlen sie eine Begrenzung der Impulsfolgefrequenz auf 2 Hz. FISCHER (1990) stellte bei einer Erhöhung der Impulsfolgefrequenz von 4 auf bis zu 20 Hz bei jeweils konstanten übrigen Parametern eine nahezu lineare Zunahme der Schmelzspurbreite und -tiefe fest.

Die Notwendigkeit des Einsatzes von Schutzgas wird kontrovers diskutiert. Nach BRUNNER und JUNGE (1989) sowie DORN et al. (1992) schützt das Inertgas das Schweißbad vor einer Reaktion mit der umgebenden Luft und verhindert somit eine Oxidation. Des Weiteren wird die Bildung von Lunkern reduziert. Auch in der

Untersuchung von VAN BENTHEM et al. (1978) erwies sich die umgebende Atmosphäre als entscheidend, da die Massenverlustbeträge in Luft und Argon aufgrund unterschiedlicher Oxidbildung, welche die Ausbildung der Schmelze und der Gasphase beeinflusst, erheblich differieren. 1979 konnten VAHL et al. feststellen, dass beim Laserpulsschweißen die Atmosphäre einen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit hat. Die höchsten Werte wurden für die Schweißungen unter Argonumspülung bestimmt. Im Gegensatz dazu ist nach VAN BENTHEM (1992) die Schutzgaszufuhr bedeutungslos. Nach FISCHER (1990) bleibt die Verwendung von Schutzgas ohne Einfluss auf Schmelzspurbreite und –tiefe, während DOBBERSTEIN (1990) eine signifikante Vergrößerung der Laserspurbreite feststellen konnte. Bei der Auswertung des Quotienten aus Schweißnahttiefe und –breite stellte FREYTAG (1993) mit der Argon-Nah-Abschirmung um 10 – 20 % höhere Werte als beim Schweißen ohne Schutzgas bzw. mit Stickstoff- oder Argon-Fern-Abschirmung fest. Diese Ergebnisse wurden durch die Röntgenuntersuchung und die Bestimmung der Zugfestigkeit unterstrichen. KEMPKA (1985) konnte lediglich bei Verwendung eines Vakuums um bis zu 30 – 100 % größere Schweißnahttiefen feststellen. Ansonsten zeigten die untersuchten Atmosphären Luft und Argon sowie das Vakuum keinen Einfluss auf Härte und Zugfestigkeit.

Nach FINKE (1998) kann auch durch Zufuhr von Schutzgas eine Oxidation nicht vollständig verhindert werden, da auf der Oberfläche des Werkstückes immer adsorbierteter Restsauerstoff vorhanden ist. Dabei bildet sich im Bereich der Wärmeeinflusszone eine schwach gelbe Anlauffarbe, deren Lochfraßpotential tolerierbar sei. Möglicherweise handelt es sich dabei um eine verdickte Passivschicht. Die Bildung der Anlauffarben, die sich als farbige Streifen parallel zur Schweißnaht darstellen, beruht nach FINKE auf Diffusionsvorgängen der Legierungselemente zur Oberfläche und anschließender Oxidation. Für das Ausmaß der Entstehung dieser Oxidschichten sind die lokale Temperatur und deren zeitlicher Verlauf entscheidend, da diese Faktoren die Diffusionsvorgänge der Legierungselemente bestimmen. Während bis zu einer Temperatur von 400 °C lediglich eine Verdickung der Passivschicht eintritt, erhalten die Anlauffarben oberhalb dieser Bildungstemperatur eine sogenannte Duplexstruktur. Dabei bildet sich eine chromarme Eisenoxidschicht an der Oberfläche, an welche sich eine Zone ausgeprägter Chromanreicherung anschließt. Auf diese wiederum folgt im Bereich der ehemaligen Phasengrenze Metall/Passivschicht eine chromverarmte Zone. Die zu erkennenden Farben entstehen in Abhängigkeit von der Schichtdicke durch Interferenzen infolge von Lichtbrechung und –reflexion, wobei die Farbskala mit zunehmender Schichtstärke von gelb über rot nach blau verläuft. Diese Anlauffarben haben im Gegensatz zu der weniger als 5 nm

dicken, aus einem dichten, schwerlöslichen Chromoxid bestehenden Passivschicht keine schützende Wirkung gegen Korrosion.

Auch über die Verwendung von Zusatzwerkstoffen gibt es unterschiedliche Aussagen. VAN BENTHEM (1992) bemerkte, dass durch das Einbringen spaltfüllender Folien vermehrt Lunker und Gasblasen in der Schweißzone auftreten, welche eine Reduktion der Zerreißfestigkeit zur Folge haben könnten. Des Weiteren stelle die Überbrückung keilförmiger Spalte eine besondere Schwierigkeit dar, da eine Folienfüllung aus geometrischen Gründen nur schwer zu realisieren ist. Dennoch kann man für die praktische Anwendung die Ergebnisse von SCHELL (1984) nicht außer Acht lassen. Nach seinen Empfehlungen sollte man ab einer Spaltbreite von 0,3 mm mit einem Zusatzwerkstoff arbeiten.

Unter anderem konnten DOBBERSTEIN (1990) und FISCHER (1990) zeigen, dass die Oberflächenbeschaffenheit nur bei reinen Metallen und stark reflektierenden Oberflächen einen Einfluss auf die Energieeinkopplung hat. Ansonsten gilt nach DOBBERSTEIN (1990) das sogenannte Schwellenwertverhalten, was durch die ähnliche Korrelation der Impulsenergie mit der Schmelzspurbreite und -tiefe bei Konstanz der anderen Parameter bestätigt wird. Leistungsdichten von 5×10^5 W/cm² erzeugten trotz unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit der Probekörper keine signifikant differenten Schmelzspurgeometrien (DOBBERSTEIN 1990).

KASENBACHER (1997) untersuchte lasergeschweißte Proben der Legierung Vitallium® (Austenal, Chicago, USA) auf die Existenz von Eigenspannungen. Beide angewandte Verfahren – die zweidimensionale röntgenographische Spannungsermittlung und die dreidimensionale Spannungsermittlung nach der Finite Elemente Methode – ergaben in der Laserstrahlschweißnaht eine unsymmetrische Verteilung von Druck- und Zugeigenspannungen. Ihre Existenz wurde auch durch verbogene Kristallebenen belegt, die sich durch metallographische Untersuchungen darstellen ließen. Nach den Ergebnissen bewirken die Zugeigenspannungen direkt keinen Sprödbruch. Sie können aber indirekt dazu beitragen, wenn sie die Gesamtspannung (zusammengesetzt aus Eigen- und Lastspannung) in die Bereiche der Zugfestigkeit bringen.

2.3.4 Die Verbindung von Edelmetallen mit Nichtedelmetallen

Mit dem Einsatz kombiniert festsitzend-herausnehmbaren Zahnersatzes tritt ein weiteres Problem in der Fügetechnologie auf: Nichtedelmetalle und Edelmetalle müssen miteinander verbunden werden. Mit dieser Frage beschäftigten sich die folgenden Autoren.

Während HUBERTZ (1991) für diese Aufgabenstellung die Methode des An- oder Umgusses favorisierte, stellten GUNDLACH und KUSCHER (1996a, b) die besondere Bedeutung des Wärmeleitungsschweißens heraus und wiesen auf die Besonderheit dieser Fügetechnik bei der Verwendung der verschiedenen dentalen Legierungen und deren Kombinationen hin.

In ähnlicher Weise hoben FRENTZEN und KOORT (1991) das Laserschweißen zum Vereinigen von unterschiedlichen Legierungen als ein bruchsicheres, reproduzierbares Fügen mit hoher Passgenauigkeit und Korrosionsbeständigkeit hervor.

MEYER (1999) testete die Kombinationen der NEM-Legierung Remanium® GM 800 mit je einer der vier verwendeten hochgoldhaltigen Legierungen Orplid EH® (Hafner, Pforzheim, D), Pontor LFC®, Pontor MPF®, Solaro 3® (alle drei: Fa. Metalor, Stuttgart, D) auf ihre Qualität. Die makroskopische Beurteilung allein ließ auf ein befriedigendes Schweißergebnis schließen. Die angewendeten mikroskopischen Verfahren deckten jedoch bei allen Legierungskombinationen nicht durchgeschweißte Nähte, thermische Spannungsrisse, Porositäten und Gasblasen auf.

Auf das Problem der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten bei der Verwendung von Edelmetall- und Nichtedelmetall-Legierungen gingen HOFMANN und LINDIGKEIT (1999b) ein. Sie prüften den Einfluss der Laserstrahlpositionierung mit gleichen und verschiedenen Anteilen auf den zu verschweißenden Materialien Orplid H® und Remanium® GM 800. Die mikroskopische Untersuchung der Fügestellen zeigte, dass eine Laserstrahlpositionierung zu 2/3 auf der Legierung mit der größeren Wärmeleitfähigkeit – dem Edelmetall Orplid H® – vorteilhaft ist.

Ein neues Verfahren zur Herstellung von Titansuprastrukturen stellte GLÖCKNER (1997) vor. In Kombination mit der Procera®-All-Titan-Technologie zur Fertigung von Kronen und Brücken werden mit dem neuen Lasersystem die einzelnen Kronen und vorgefertigten Zwischenglieder zu Suprastrukturen vereinigt. Genutzt wird hierzu ein sogenannter Nd:YAG-Stereo- oder Doppellaser. Dabei wird der Laserstrahl gesplittet und gelangt über zwei gegenüberliegende Optiken an das Werkstück. Durch Beschuss der Konstruktion von beiden Seiten soll ein Verziehen des Gerüstes vermieden werden.

2.3.5 Schlussfolgerungen für die eigenen Untersuchungen

Betrachtet man die Literatur zum Thema Laserschweißen im Überblick, fällt die starke Ausrichtung der Forschungsarbeiten auf die Beurteilung von dentalen Gusslegierungen ins Auge. Edelstahldrähte, die sowohl in der Kieferorthopädie als auch in der Prothetik zur Anwendung kommen, sind bezüglich des Laserschweißens bisher nur in geringem Maße untersucht worden.

Aus den Veröffentlichungen von LAATZ (1997) sowie von HOFMANN und LINDIGKEIT (1999a) kann man schlussfolgern, dass weder die Laserschweißung gekreuzt-überlappter Drähte noch die Vereinigung der Drähte Stoß-an-Stoß zu einer ausreichenden Festigkeit führen können. Lediglich mittels einer Verstärkung der Stoß-an-Stoß-Verbindung durch ein parallel angeschweißtes Stück Draht mittig zur primären Schweißstelle konnten entsprechende Zugfestigkeiten erzielt werden. Aus dieser Erkenntnis erwuchs die Frage nach der Möglichkeit einer primär parallelen Drahtanordnung zur Laserschweißung, wobei die Strahlung zentral auf die Berührungsstelle beider Drähte treffen sollte. Bestätigt wurde die Möglichkeit einer solchen Schweißnahtkonfiguration durch die Ergebnisse von ÖHLSCHLÄGER (1986) aus der industriellen Anwendung. Für die praktische Nutzung dieser Fügestellenkonstruktion in der Zahntechnik muss aber zunächst geklärt werden, mit welchen Laserparametern eine Verbindung mit größtmöglicher Zugfestigkeit erzielt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass die Auswahl der entsprechenden Laserbetriebsgrößen kompliziert ist, da sowohl durch die bereits erläuterte Strahlenfalle als auch durch die minimale Berührungsfläche der Drähte die Gefahr von Bohreffekten erhöht wird. Hinzu kommen die unterschiedlichen Ausstattungen und Leistungen der in den Veröffentlichungen aufgeführten Lasergeräte. So wird in einer Vielzahl der Publikationen die Impulsenergie als Einflussfaktor angegeben, während in anderen Untersuchungen die Spannung aufgeführt wird. Ein ähnliches Problem stellt die Angabe des Laserstrahldurchmessers dar, da die Vergrößerung oder Verkleinerung des Strahles in einigen Veröffentlichungen in Skalenteilen angegeben worden ist.

Auf eine Untersuchung der Pulsfrequenz wird in dieser Arbeit aus folgenden Gründen verzichtet: In der zahntechnischen Praxis erfolgt die Positionierung des Werkstückes in den Fokus des Laserstrahls per Hand, so dass eine individuelle Auslösung des Laserstrahles erforderlich ist. Des Weiteren steht bei dieser geringen Probendimensionierung die exakte Ausrichtung der zu fügenden Teile in den Laserstrahl im Vordergrund. Eine Überlappungslänge der Schweißperlen von mindestens 60 % wurde allgemein als günstig angesehen und ist aus diesem Grund in den Untersuchungen konstant gehalten worden.

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungsmaterial

Für die Erstellung der Versuchsreihen wurde der Chrom-Nickel-Stahldraht Remanium® (Dentaurum, Ispringen, D) in der Qualität „federhart“ verwendet. Dieser Edelstahl ist ein allgemein bekannter und preiswerter Werkstoff, der sowohl in der Kieferorthopädie als auch in der Prothetik zum Einsatz kommt. Die erste Untersuchungsreihe wurde an Drähten mit einem Durchmesser von 1,0 mm durchgeführt. Um gleichzeitig auch Aussagen zur Laserparameterwirkung bei geringeren Drahtdurchmessern treffen zu können, sind Drähte des Durchmessers 0,7 mm und 0,8 mm in die Untersuchungen einbezogen worden. Die Zusammensetzung des Drahtes ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tab. 1: Zusammensetzung des Drahtes Remanium® (Dentaurum, Ispringen, D)

Element	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	C	P	S
Gehalt in Gewichtsprozenten	≥ 67,36	17-19	8,5-10,5	≤ 2,0	≤ 1,0	≤ 0,07	≤ 0,045	≤ 0,03

Bei diesem Draht handelt es sich um einen legierten Edelstahl, dessen wichtigste Legierungskomponenten folgende Funktionen erfüllen:

- Chrom führt ab einem Legierungsanteil von 12 % durch die Reaktion mit Sauerstoff zu einer sehr stabilen Chromoxidschicht auf der Oberfläche des Metalls. Dieser als Passivierung bezeichnete Vorgang erhöht die Korrosionsbeständigkeit des Stahles maßgeblich und verringert damit das allergene Potential (COMBE, 1985; DILTHEY, 1995; SERNETZ, 1996).
- Nickel als weiteres Legierungselement hat starken Einfluss auf das Mikrogefüge des Stahls. Bei unlegierten Stählen erfolgt oberhalb von ca. 900 °C die Umwandlung des bei Raumtemperatur vorkommenden kubisch-raumzentrierten Kristallgitters (= Ferrit oder α -Eisen) zum kubisch-flächenzentrierten Kristall (=Austenit oder γ -Eisen). Dieser zeichnet sich durch seine deutlich bessere Formbarkeit und geringere Sprödigkeit aus. Durch das Zulegieren von Nickel wird das γ -Eisen so stabilisiert, dass es auch bei Raumtemperatur existiert (MARXKORS und MEINERS, 1993).

- Des Weiteren bewirken neben Chrom und Nickel auch Silizium und Mangan eine Festigkeitssteigerung (DUBBEL, 1990).

An Hand des von Schaeffler entwickelten und von De Long modifizierten Diagrammes lässt sich in Abhängigkeit von den Legierungselementen die Gefügezusammensetzung des Schweißgutes bestimmen (ANIK 1995, DILTHEY 1995). Dabei wird die summarische Wirkung der Ferritbildner Chrom, Molybdän, Silizium und Niob über ein Chromäquivalent und der Austenitbildner Nickel, Mangan, Kohlenstoff und Stickstoff über ein Nickeläquivalent erfasst. Die Legierungselemente sind entsprechend der Stärke ihrer Wirkung gewichtet. Das Schweißgut des Stahles Remanium® enthält demzufolge neben dem Austenit zwischen 2 und 12 % Ferrit. Mit zunehmendem Ferritgehalt nimmt die Festigkeit zu, während die Verformbarkeit abnimmt.

Der Namenszusatz „federhart“ bezeichnet Stähle mit einer Zugfestigkeit zwischen 1800 und 2000 N/mm². Diese wird während des Herstellungsprozesses - dem Drahtziehen – eingestellt. Durch Wiederholung des Kaltverformungsprozesses wird die Legierung gehärtet und ihre Festigkeit erhöht. Dabei werden die Gitterebenen gegeneinander verschoben. Somit wird die Ordnung des Systems gestört. Je höher die Unordnung ist, um so fester wird der Draht und desto geringer wird seine Verformbarkeit. Metallographisch ist eine Ziehtextur nachweisbar (SCHATT, 1991). Nur durch Zufuhr von Energie gelangen die Atome an ihre ursprüngliche Position im Gitter, es kommt zur Rekristallisation. Die Ausprägung der Unordnung wird verringert und die Verformbarkeit nimmt wieder zu. Mit dem Wechsel von Verformung und Wärmebehandlung ist die Einstellung der Zugfestigkeit bei nichtrostenden Stählen ein sehr diffizil ablaufender Prozess (SERNETZ, 1999).

3.2 Das Laserschweißgerät

Geschweißt wurde mit dem „NEOLASER L 126500“ der Firma Girrbach Dental GmbH (Pforzheim, D). Dabei handelt es sich um einen im Pulsbetrieb arbeitenden Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG-Laser) mit folgenden technischen Daten:

Gemittelte Leistung:	30 W	Impulsdauer:	0,5 -15 ms
Brennfleckdurchmesser:	0,2-2,0 mm	Impulsfrequenz:	0,5-5 Hz/Dauerpuls
Spannung:	150-390 V	Impulsspitzenleistung:	4,5 kW

Dabei wird die Impulsenergie durch die vom Bediener einzustellende Spannung festgelegt, die auf einen durch die Wahl des Fokus bestimmten Materialausschnitt auftrifft. Mit beiden Größen Spannung und Fokus wird gleichzeitig die Energieflussdichte determiniert. Wie lange der Laserstrahl auf diesen Bereich wirkt, wird durch die Impulslänge bestimmt, die ebenso vom Bediener zu wählen ist. Somit wird auch die Pulsleistung beeinflusst. Die Impulsfolgefrequenz kann in den oben angegebenen Grenzen variiert werden. Die Auslösung der Impulse erfolgt mittels Fußschalter.

Die Displayanzeige ermöglicht die ständige Kontrolle der Parameter. Diese sind auch innerhalb der Arbeitskammer einstellbar. Das Schutzgas Argon kann wahlweise durch eine oder zwei justierbare Düsen auf die Targetfläche gerichtet werden. Als Positionierhilfe für das Werkstück im Fokus des Laserstrahls dient ein Stereomikroskop mit einem integrierten Fadenkreuz, dessen Mittelpunkt mit der gewünschten Stelle des Laserstrahlbeschusses auf der Zielfläche in Übereinstimmung gebracht werden muss. Wenn sowohl das Fadenkreuz als auch die Werkstückoberfläche deutlich und scharf gesehen werden, ist die korrekte Ausrichtung in der vertikalen Dimension erfolgt.

Das verwendete Lasergerät ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



Abb. 5: „Neolaser L126500“ der Firma Girrbach Dental GmbH (Pforzheim, D)

3.3 Probenvorbereitung

Um eine möglichst gleichmäßige Qualität der Drähte zu gewährleisten und Differenzen zwischen einzelnen Tagesproduktionen und Chargen zu vermeiden, wurden die Ausgangsdrähte von einer handelsüblichen 500-g-Rolle abgetrennt. Zunächst sind sie mit der Hand gerichtet und auf Millimeterpapier bezüglich ihrer Geradlinigkeit kontrolliert worden. Die Separierung in Abschnitte von ca. 60 mm erfolgte mit dem Seitenschneider. Um die Überlappungslänge der Drahtenden genau und reproduzierbar einstellen zu können, wurden die zu verschweißenden Drahtenden an der Schleifmaschine „DENTARAPID“ (Fa. Krupp, D) mit Standardtrennscheiben für Chrom-Kobalt-Legierungen (Nr. 672000, Firma Renfert, Hilzingen, D) bei einer Umdrehungszahl von 10000 U/min begradigt (Abb. 6). Eine Überhitzung des Drahtes ist durch intermittierendes Schleifen vermieden worden. Als Halterung diente ein individuell erzeugter Gipsblock mit einer Führungsstille von 1 mm Breite, um eine ruhige und flächige Lagerung des Drahtes im Winkel von 90° zur Schleifscheibe gewährleisten zu können (Abb. 7). Die Kanten wurden per Hand mit Hilfe der Trennscheibe gebrochen. Auf ein Anrauen der Drähte im Bereich der Fügestelle zur Erhöhung der Absorption ist in dieser Untersuchung verzichtet worden, um wirklich gleiche Ausgangsbedingungen zu erhalten.



Abb. 6: Die Schleifmaschine Dentarapid wurde zum Begräden der Drähte genutzt.



Abb. 7: Detailansicht - Gipsblock mit Führungsrille sowie Schleifscheibe

3.4 Haltevorrichtung zum Schweißen - Kreuztisch

Für eine reproduzierbare und lagestabile Positionierung der Drähte wurde ein Kreuztisch entwickelt, welcher von Hand in zwei Ebenen zu bewegen ist (Abb. 8). Durch Veränderung des Tisches in vertikaler Richtung konnten die Proben in die Ebene des Fokus bewegt werden. Die Lageänderung in der horizontalen Ebene erfolgte mit einer Mikrometerschraube, so dass die Überlappung der Schweißpunkte mit einer Genauigkeit von 0,01 mm eingestellt werden konnte. Auf diesem beweglichen Tisch befand sich die Halterung für beide Drähte in Form zweier Einspannvorrichtungen. Durch je zwei Stellschrauben waren beide Haltevorrichtungen unabhängig voneinander in zwei Richtungen zu bewegen, so dass die beiden zu verschweißenden Drähte in die richtige Position zueinander gebracht werden konnten. Die Überlappung der Drahtenden über eine Länge von 5 mm wurde mittels einer Skala mit einer Genauigkeit von 0,1 mm eingestellt. Mit dem im Lasergerät installierten Stereomikroskop konnte die parallele und spaltfreie Lagerung der Drahtenden kontrolliert werden.

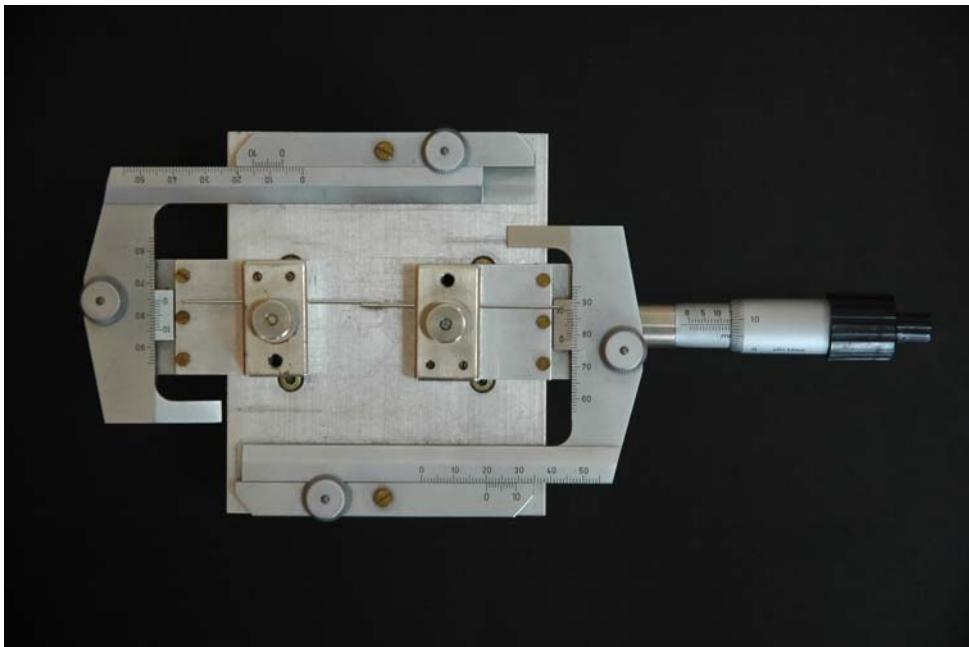


Abb. 8: Kreuztisch in der Gesamtansicht, entwickelt und gebaut von Herrn H. Benkwitz in der feinmechanischen Werkstatt des Fachbereiches Physik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

3.5 Voruntersuchungen

Über die Qualität einer Schweißverbindung entscheidet neben den direkt am Gerät zu wählenden Parametern auch die Überlappung der einzelnen Schweißpunkte. Um diese Einflussgröße bei allen Schweißverbindungen konstant halten zu können, wurden zunächst für jede Parameterkombination die Durchmesser der einzelnen Schweißperlen in Richtung der Schweißnaht mit Hilfe des Fadenkreuzes im Mikroskop und der Mikrometerschraube des Kreuztisches bestimmt. Auf diese Weise konnte der Vorschub berechnet werden, der notwendig war, um eine konstante Überlappung der Schweißpunkte von 60 % zu gewährleisten.

Zwecks Erzielung möglichst anlauffarbenfreier Verbindungen wurde von Seiten des Schweißgerätherstellers Argon als Schutzgas empfohlen. Zur Optimierung seiner Wirkungen sind zunächst die Ausrichtung der Schutzgasdüse und die Menge an strömendem Argon variiert worden. Als günstig erwies sich ein Gasdurchfluss von 4,5 ml/min. Die Schutzgasdüse wurde in einem Abstand von ca. 10 mm und einem Winkel von ca. 45 Grad zur Schweißebene eingestellt. Der Argonstrom war in Richtung des Arbeitsfortschrittes auf die Schweißnaht gerichtet.

Des Weiteren wurden für die Laserbetriebsparameter Spannung, Impulslänge und Größe des Fokus die Grenzen bestimmt, innerhalb derer eine Schweißung mit den gewählten Drähten möglich war. Die zunächst angenommene Obergrenze der Spannung (280 V) konnte aufgrund zu häufiger und sehr ausgeprägter Materialschädigungen nicht in die Untersuchungsreihe aufgenommen werden. Aus den Ergebnissen der Vorversuche resultieren folgende Parameterwerte für die eigentliche Untersuchung:

Spannung : 180 V, 205 V, 230 V, 255 V

Impulslänge : 1,0 ms; 2,5 ms; 5,0 ms; 7,5 ms; 10,0 ms

Fokus : 0,2 mm; 0,4 mm; 0,6 mm; 0,8 mm; 1,0 mm.

3.6 Erstellen der Versuchsreihe

Von jeder Parameterkombination sollten fünf Verbindungen hergestellt werden. Während der Versuche stellte sich jedoch heraus, dass mit einzelnen Parameterkonstellationen die Drähte nur oberflächlich erwärmt worden waren, in der Schweißfuge keine Verschmelzungen zwischen den Drähten erfolgten und eine Verbindung demzufolge nicht erzielt werden konnte. Im Gegensatz dazu wurde bei anderen Laserbetriebsgrößen der Draht so stark erhitzt, dass Bohreffekte und Oxidationen bis hin zu Verkohlungserscheinungen auftraten. In beiden Fällen wurde die Anzahl der Probekörper auf zwei reduziert und auf die Einbeziehung der entstehenden Verbindungen in die Festigkeitsuntersuchungen verzichtet.

Vor dem eigentlichen Schweißen wurden die Drähte mit einem alkoholgetränkten Tuch gesäubert, um absorptionsbeeinflussende Verunreinigungen zu beseitigen. Zum Fügen von je zwei Drähten sind diese in die oben beschriebene Probenhalterung mit einer Überlappung von 5 mm eingespannt worden. Ihre zwanglose Positionierung wurde mittels des geräteinternen Stereomikroskops überprüft. Zunächst sind die Drähte zur Fixierung auf einer Seite mittig, auf der Gegenseite in ca. 1 mm Abstand von den Überlappungsenden mit je einem Schweißpunkt gehaftet worden. Damit konnte ein Verzug der Drähte verhindert und die spaltfreie Lagerung der Drähte zueinander gewährleistet werden. Für diese Fixierung kamen bei allen Proben folgende Parameter zur Anwendung: Fokus 0,3 mm, Spannung 200 V, Impulslänge 1,0 ms. Mit dieser Parameterkombination konnten minimale Heftpunkte mit geringer Stabilität gesetzt werden (Zugfestigkeit: 199,4 N/mm², entspricht einer prozentualen Zugfestigkeit von

10,16 %), welche die Zugfestigkeit der eigentlichen Schweißnaht nicht beeinflussten. Nach dem Wenden der Proben wurde eine vollständige Naht mit Einzelimpulsen geschweißt. Die Schweißung der Gegenlage erfolgte nach dem Drehen der Probe in entgegengesetzter Richtung zur ersten Naht. Auf diese Weise sollten die mit Beginn einer Impulsreihe gewöhnlich geringeren Laserstrahlleistungen gleichmäßig auf beide Enden der Probekörper verteilt werden. Die differierenden Leistungen sind laut DORN et al. (1992) auf eine Erwärmung des Laserstabes durch die Blitzlampenstrahlung zurückzuführen. Des weiteren kommt es während des Schweißens zu einer Aufheizung der Probe, was zu einer Erhöhung der Absorption und damit möglicherweise gleichzeitig zu einer Vergrößerung der Schweißnahttiefe führen kann (KEMPKA, 1985). So nimmt nach DORN et al. (1992) der Absorptionskoeffizient mit steigender Temperatur des Werkstoffes zu.

Die erstellten Probekörper wurden anhand ihrer makroskopisch zu erkennenden Oberflächenqualität eingeteilt und anschließend der Zugfestigkeitsprüfung unterzogen. Die Klassifizierung der Probekörper wird in Kapitel 4.1 erläutert.

3.7 Zugfestigkeitsprüfung

Die Zugfestigkeitsprüfung erfolgte in der Universalprüfmaschine Z 020 (Fa. Zwick, Ulm, D) des Fachbereiches Werkstoffwissenschaften der Fachhochschule Merseburg mit folgenden Kennwerten:

Die Drähte wurden in Parallelspannköpfe beidseitig in gleicher Länge eingespannt und bei einer Vorkraft von 2 N und einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min gezogen. Der Ausgangsdurchmesser der Drähte außerhalb der Schweißnaht wurde vor der Zugbelastung mittels eines Messschiebers mit elektronischer Datenangabe bestimmt. Die entsprechenden Werte für Spannung und Dehnung sind automatisch registriert und als Diagramm dargestellt worden. Gleichzeitig erfolgte die computergestützte Berechnung der statistischen Größen Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient für jede Prüfkörpergruppe (mit je fünf Proben).

Als entscheidendes Vergleichskriterium interessierte vor allem die Zugfestigkeit der geschweißten Proben bezogen auf die Ausgangsfestigkeit des ungeschweißten, gerichteten Drahtes. Die Drähte wiesen herstellerseitig nicht exakt eine Stärke von 1,0 mm auf. Es wurden Durchmesser von 0,97 mm und 0,98 mm gemessen. Ein direkter Vergleich der Zugfestigkeiten von Ausgangsdraht und Prüfkörpern ist deshalb nicht möglich gewesen. Für die beiden Drahtstärken 0,97 mm und 0,98 mm wurden die Ausgangzugfestigkeiten separat als Mittelwert aus je fünf Drahtabschnitten ermittelt

und für die jeweiligen Prüfkörper als Bezugswerte mit 100 % Zugfestigkeit zugrunde gelegt. Aus den erhaltenen Absolutwerten der Zerreißfestigkeit der Probekörper ist dann ein relativer (prozentualer) Wert ermittelt worden. Erst durch die Berechnung der prozentualen Zugfestigkeit wurde ein direkter Vergleich aller Proben möglich.

Des Weiteren unterscheiden sich Ausgangsdrähte und Prüfkörper in ihren Querschnitten und der Belastungsrichtung während des Zugversuches. Während der Durchmesser des Ausgangsdrahtes 0,97 mm bzw. 0,98 mm beträgt, verdoppelt er sich bei den gefügten Probekörpern im Bereich der Schweißnaht. Aus einem reinen Zugversuch wird beim Überlappstoß ein Scherzugversuch.

3.8 Mikroskopische Untersuchungen

Ziel dieses Untersuchungsteils war die Überprüfung des Gefüges innerhalb der Schweißnaht bezüglich der Schweißnahttiefe und -breite. Zu klären war, ob die genutzten Laserparameter ein vollständiges Durchschweißen der Proben ermöglichen. Des Weiteren sollte festgestellt werden, ob eine Wärmeeinflusszone bei dem verwendeten Material nachzuweisen ist und ob ein Zusammenhang zwischen den Laserparametern und der Größe der Wärmeeinflusszone besteht. Dieser Teil der Untersuchungen wurde in Zusammenarbeit mit Dr. J. Trempler im Institut für Werkstoffwissenschaften des Fachbereiches Ingenieurwissenschaften der Martin-Luther-Universität in Merseburg durchgeführt.

Die untersuchten Proben sind Beispiele unterschiedlicher Oberflächenqualitäten bzw. Zugfestigkeiten. Die Prüfkörper wurden für die mikroskopische Gefügebetrachtung wie folgt vorbereitet: Die überstehenden Drahtenden wurden an je einer Seite mittels Seitenschneider entfernt und die Proben senkrecht in das kaltaushärtende, dünnflüssige Epoxidharz EPO-THIN 20-8140-032 mit dem Härter EPO-THIN 20-8142-016 der Firma BUEHLER (Düsseldorf, D) im vorgeschriebenen Mischungsverhältnis 5 Teile Harz und 1 Teil Härter eingebettet. Die Aushärtungszeit betrug 24 Stunden. Die Schliffpräparate sind nach dem Entformen automatisch mit der Schleif- und Poliermaschine „MOTOPOL 8“ und dem Automatikkopf „METASERV“ der Firma Buehler mit den folgenden Parametern bearbeitet worden: Schleifen mit 200 N für je 7 Minuten auf den Siliziumcarbidpapieren der Körnung 320, 400, 600, 800, 1200, 2400 und 4000 bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit der Schleifscheibe von 100 U/min. Die Drehrichtung des Automatikkopfes wurde entgegen der Drehrichtung der Schleifscheibe eingestellt. Die Politur erfolgte mit einem weichen Tuch (MICROCLOTH) und Diamantsuspension METADI SURPREME 1µm (beides Firma

Buehler) bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 50 U/min und einem Anpressdruck von 100 N bis zur im Mikroskop geprüften Kratzerfreiheit. Diese wurde nach etwa 10 min. erreicht. In den letzten drei Minuten rotierten die Polierscheibe und der Probenhalter in der gleichen Richtung. Zur Darstellung der Gefügezonen mussten die Proben anschließend geätzt werden. Dazu wurde das von GOERENS (BECKERT und KLEMM, 1984) angegebene Ätzmittel für nichtrostende Stähle durch Erhöhung des Salpetersäureanteils modifiziert.

Es wurden folgende Chemikalien genutzt:

25 ml H₂O

25 ml HCl

5 ml HNO₃

0,15 – 2 ml Dr. Vogels Sparbeize

Bei letztgenanntem Präparat handelt es sich nach Angaben des Herstellers (Firma Buehler) um die Mischung eines organischen Lösungsmittels mit Thioharnstoff. Die Zugabe von Vogels Sparbeize bewirkt nach BECKERT und KLEMM (1984) eine gleichmäßige Gefügeentwicklung. Bei dieser Zusammensetzung des Ätzmittels ist eine Einwirkzeit von ca. zwei Stunden erforderlich. Durch eine weitere Erhöhung des Salpetersäureanteils (5-7 Tropfen) verringert sich diese Zeit auf ca. 30 Minuten.

Die Betrachtung und Auswertung der Gefügebilder erfolgte mit dem Mikroskop „NEOPHOT 2“ (Fa. Carl-Zeiss-Jena, D). Für die Übersichtsaufnahmen sind folgende Einstellungen gewählt worden: Objektiv: 6,3x/0,12; Projektiv: 3,5; Schaltwalze: 10x. Für die Detailaufnahmen wurde das Objektiv 25x/0,8 eingesetzt. Mit Hilfe einer am Mikroskop angeschlossenen Kamera konnten die fotografischen Aufnahmen gemacht werden. Die Belichtungszeit wurde über die Belichtungsautomatik BA 2 gesteuert.

3.9 Statistische Auswertung

Die statistischen Berechnungen und die Erstellung der Diagramme erfolgten mit dem Programm SPSS 10.0 (SPSS GmbH Software, München, D). Der Einfluss der Laserparameter auf die Höhe der Zugfestigkeit wurde mit dem Modell der ein- bzw. mehrfaktoriellen linearen Regression untersucht. Zur Prüfung des Zusammenhangs zwischen den Laserparametern und der Oberflächenqualität der Verbindungen bzw. zwischen den Laserparametern und der Lokalisation der Bruchstelle wurde der Chi-Quadrat-Test genutzt. Die Prüfung auf Normalverteilung der Zugfestigkeitswerte erfolgte mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test. Mit dem U-Test nach Mann und Whitney bzw. dem H-Test nach Kruskal und Wallis wurde untersucht, ob sich die Gruppen mit unterschiedlichen Oberflächenqualitäten bzw. Bruchlokalisationen hinsichtlich ihrer Zugfestigkeiten unterscheiden.

4 Untersuchungsergebnisse

4.1 Beurteilung der Oberflächenqualität

Vor der Zugfestigkeitsprüfung wurden die einhundert Prüfkörpergruppen nach ihrem makroskopischen Erscheinungsbild beurteilt. So ergaben sich entsprechend der Variabilität der Oberflächenausprägung verschiedene wiederkehrende Eigenschaften, die zu einer Klassifizierung der entstandenen Drahtverbindungen herangezogen werden konnten. Bei ungünstiger Kombination der drei Laserparameter Spannung, Impulslänge und Fokus kann es zu einer Zerstörung der Drähte kommen. Dabei gibt es verschiedene Ausprägungsarten dieser Materialschädigungen. Neben Verkohlungen treten auch Materialverdampfungen und ein explosionsartiger Materialabtrag auf. Ein Beispiel für eine solche Verbindung zeigt die Abbildung 9.



Abb. 9: Oberfläche einer Verbindung, die mit zu hoher Energie geschweißt wurde.
Schweißparameter: Fokus 0,2 mm, Spannung 230 V, Impulslänge 2,5 ms;
Drahtdurchmesser: 1,0 mm

Wie die Perlen auf der Drahtoberfläche zeigen, lagern sich die herausgeschleuderten Anteile der flüssigen Schmelze als Kondensate auf dem Schweißgut ab. Diese oder ähnliche Erscheinungen traten bei 25 verschiedenen Laserparameterkombinationen auf.

Im Gegensatz dazu führten sechs Parameterkombinationen nicht zu einer Vereinigung der beiden parallel gelagerten Drähte, so dass auch diese nicht in die Zugfestigkeitsuntersuchungen einbezogen werden konnten. Einen Überblick über die zugrundeliegenden Laserparameter dieser beiden Gruppen gibt das folgende Diagramm.

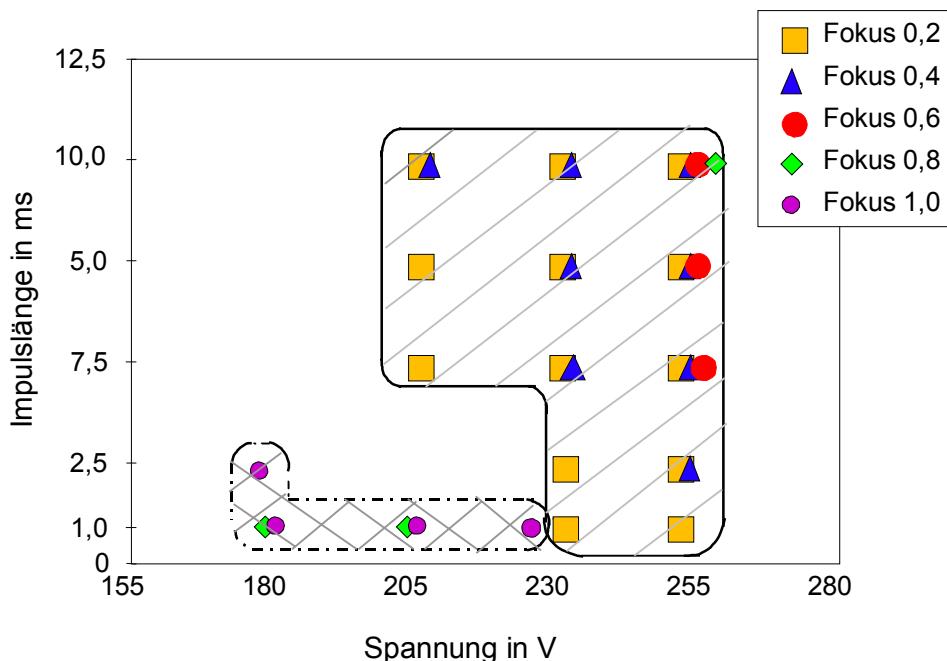


Abb. 10: Zusammenfassung der Laserparameter, die zu einer Materialschädigung (—) führten bzw. keine Verbindung der Drähte erzielten (---), Drahtdurchmesser: 1,0 mm

Mit allen anderen Laserparameterkombinationen lassen sich nahezu blanke Schweißverbindungen herstellen. Diese können noch einmal in folgende zwei Gruppen unterteilt werden:

1. Drahtverbindungen, bei denen sowohl der Draht als auch die Schweißnaht keine Anlauffarben aufweisen. Diese Verbindungen sind vollkommen blank. Die Schweißnähte zeichnen sich durch regelmäßige und runde Schweißpunkte aus. Von den einhundert möglichen Laserparameterkombinationen konnten 31 dieser Gruppe mit einer guten Oberflächenqualität zugeordnet werden.

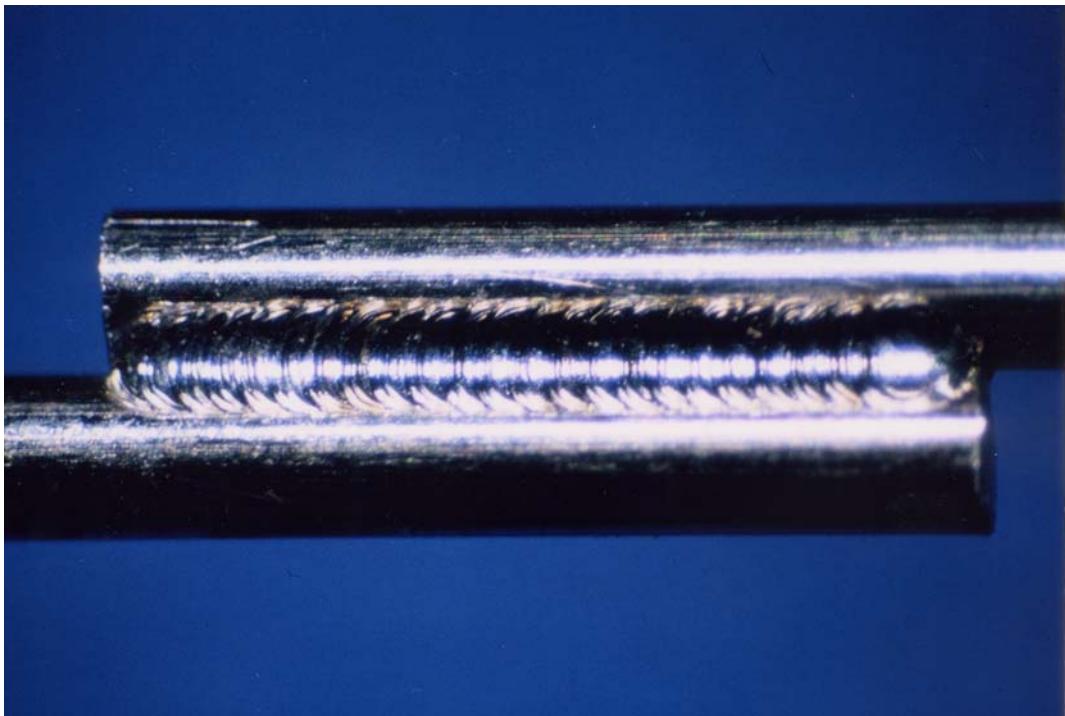


Abb. 11: Beispiel einer optimalen Schweißnaht. Parameter: Fokus 0,4 mm, Spannung 205 V, IPL 2,5 ms; Drahtdurchmesser: 1,0 mm

2. Drahtverbindungen, die ebenso über blanke Schweißnähte verfügen, jedoch geringfügige Veränderungen im Randbereich oder direkt in der Schweißnaht aufweisen. Die betreffenden 38 Parameterkombinationen sind zu der Gruppe mit einer „fehlerhaften“ Oberflächenqualität zusammengefasst worden. So sind zum Beispiel die Ausgangsdrähte innerhalb eines schmalen Streifens direkt neben den Schweißnähten gelb angelaufen, wie die Abbildung 12 zeigt. Zu dieser Gruppe zählen auch jene Verbindungen, bei denen sowohl die Ausgangsdrähte als auch die Fügezonen blank sind, die Schweißnähte jedoch unregelmäßig erscheinen. Ist eine Schweißnaht vorhanden, sind die Schmelzpunkte nicht rund, sondern sie scheinen zu „zerfließen“.

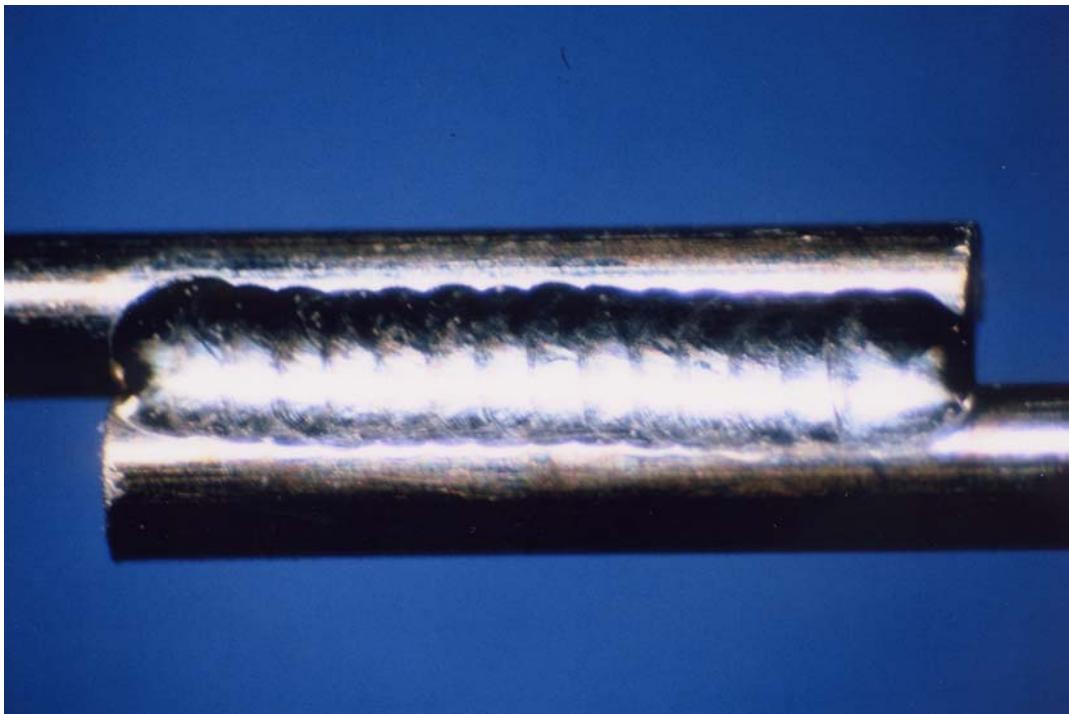


Abb. 12: Beispiel für einen Draht mit Anlauffarben; Parameter: Fokus 0,6 mm, Spannung 205 V, IPL 10,0 ms; Drahtdurchmesser: 1,0 mm

Im Folgenden wird untersucht, ob die eingesetzten Laserparameter einen Einfluss auf die Qualität der Schweißnahtoberfläche ausüben.

4.1.1 Der Einfluss der Laserparameter auf die Qualität der Oberfläche

Für alle drei Laserparameter wurde mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests geprüft, ob ein Einfluss auf die Oberflächenqualität der geschweißten Verbindungen nachzuweisen ist. Dabei sind die 38 „fehlerhaften“ und 31 von vornherein nicht gezogenen Prüfkörpergruppen zu einer Gruppe zusammengefasst worden. Demgegenüber stehen die 31 Verbindungen mit guten Oberflächenmerkmalen.

Mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit p von 0,005 besteht lediglich zwischen der Impulslänge und der Oberflächenausprägung ein statistisch signifikanter Zusammenhang. Zwischen der Laserspannung bzw. dem Fokus und der Oberflächenausprägung konnte dieser Zusammenhang nicht nachgewiesen werden ($p = 0,24$ bzw. $0,18$).

In der Abbildung 13 ist für die Oberflächenausprägungen „gut“ und „schlecht“ die prozentuale Verteilung in Abhängigkeit von der Impulslänge dargestellt.

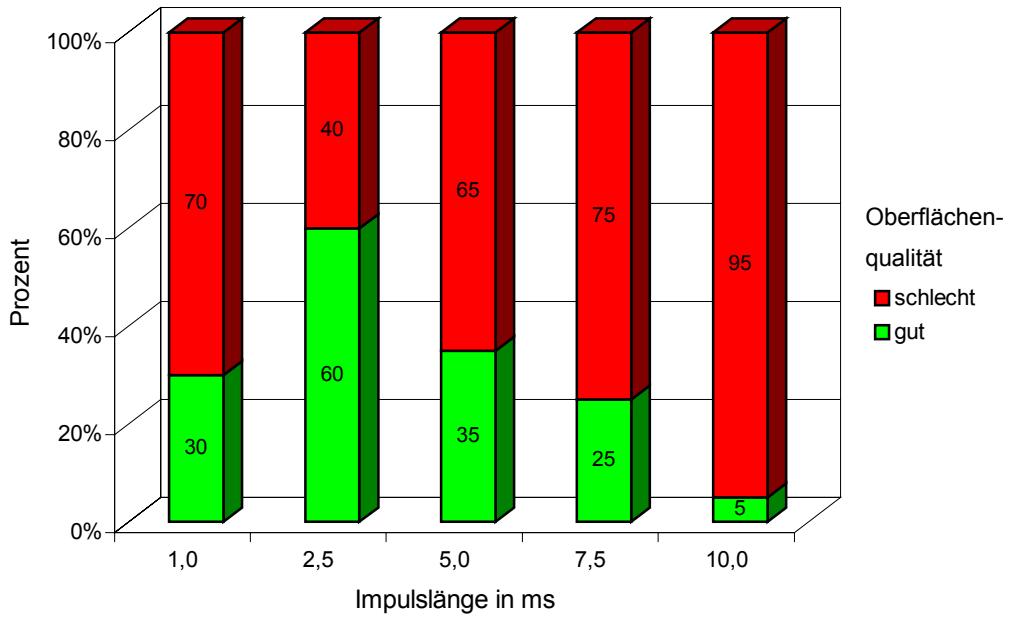


Abb. 13 : Prozentuale Verteilung der Oberflächenausprägungen „gut“ und „schlecht“ in Abhängigkeit von der Impulslänge

Mit einer Impulslänge von 2,5 ms entstehen bei 60 % der Schweißverbindungen gute Oberflächenqualitäten. Im Gegensatz dazu führt die Impulslänge 10,0 ms bei 95 % der Verbindungen zu einer schlechten Oberflächenbeschaffenheit.

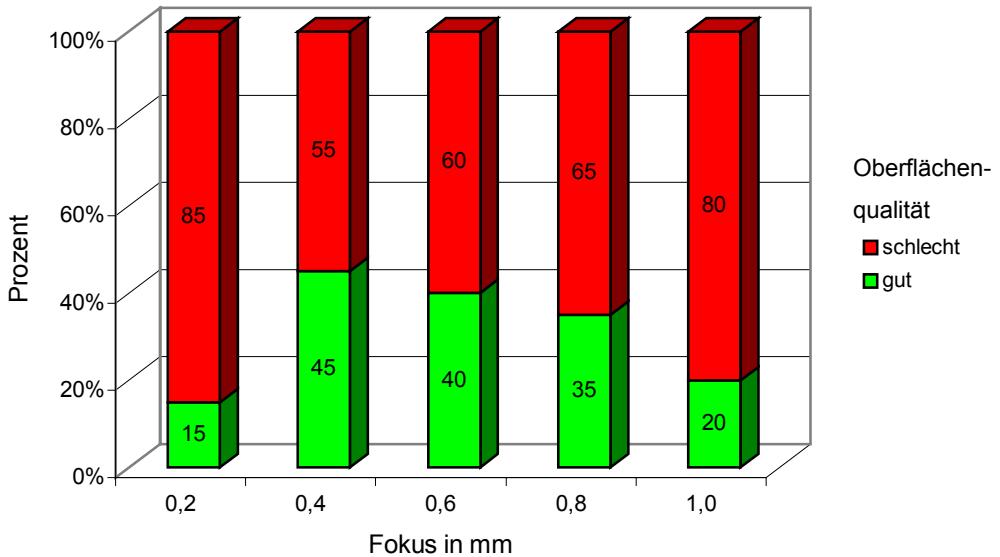


Abb. 14: Prozentuale Verteilung der Oberflächenausprägungen in Abhängigkeit vom Fokus

Bei den Fokusgrößen 0,2 mm bzw. 1,0 mm weisen 85 % bzw. 80 % der entstandenen Schweißverbindungen qualitativ schlechte Oberflächen auf.

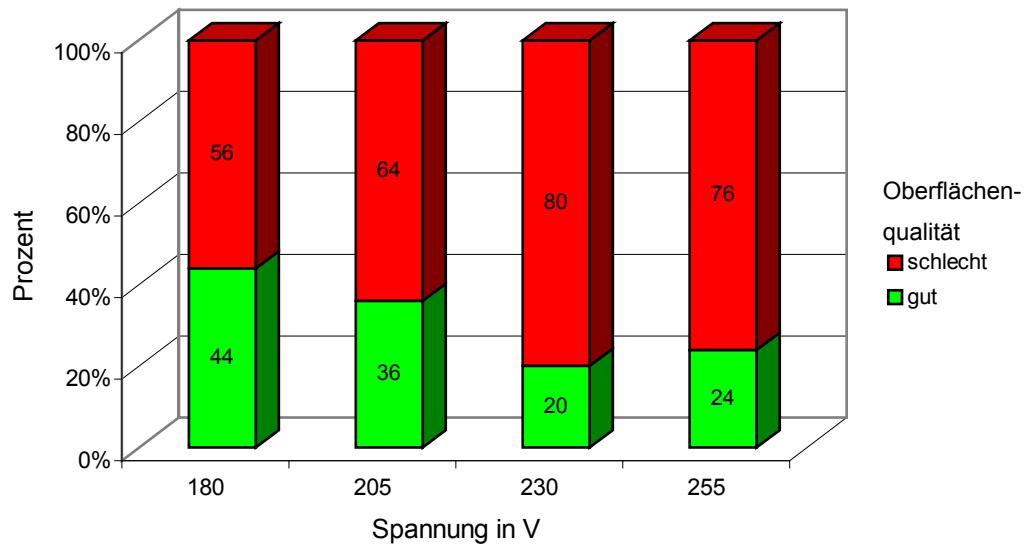


Abb. 15: Prozentuale Verteilung der Oberflächenausprägungen „gut“ und „schlecht“ in Abhängigkeit von der Spannung

Ähnliche Werte sind bei den Spannungen 230 V (80 %) und 255 V (76%) zu verzeichnen.

Des Weiteren ist untersucht worden, ob sich die beiden Gruppen unterschiedlicher Oberflächenqualitäten hinsichtlich ihrer Zugfestigkeiten unterscheiden. Dafür wurde der U -Test nach Mann und Whitney genutzt, da mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test keine Normalverteilung der Zugfestigkeitswerte nachgewiesen werden konnte ($p = 0,016$).

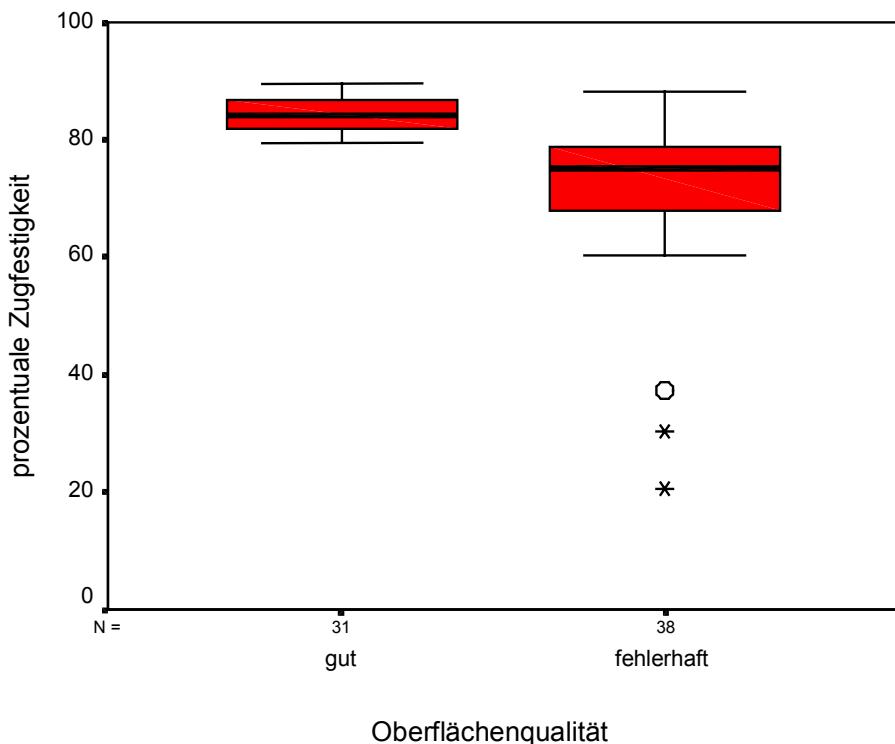


Abb. 16: Verteilung der Zugfestigkeitswerte in Abhängigkeit von der Oberflächenqualität

Die Verteilung der Zugfestigkeitswerte der 31 Verbindungen mit einer als „gut“ klassifizierten Oberfläche unterscheidet sich von den 38 Verbindungen mit einer „fehlerhaften“ Oberfläche statistisch signifikant. Die Irrtumswahrscheinlichkeit p ist kleiner 0,0001. Jedoch zeigen die Untersuchungsergebnisse insgesamt, dass die Festigkeit der Schweißverbindungen nicht allein nach der erkennbaren Oberflächenqualität beurteilt werden kann.

Der Einfluss der Laserparameter Impulslänge, Spannung und Fokus auf die Höhe der Zugfestigkeit wird in den folgenden Abschnitten untersucht.

4.2 Die Zugfestigkeit für den Drahtdurchmesser 1,0 mm

4.2.1 Der Einfluss der einzelnen Laserparameter auf die Zugfestigkeit

Mit Hilfe der einfaktoriellen Korrelationsanalyse konnte nachgewiesen werden, dass lediglich die Impulslänge einen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit der geschaffenen Verbindung ausübt (Tab. 2 und Abb. 17 auf Seite 39). Die Irrtumswahrscheinlichkeit p beträgt 0,002.

Zwischen den Laserparametern Spannung bzw. Fokus und der Zugfestigkeit besteht kein Zusammenhang, wie auch die Abbildungen 18 und 19 auf Seite 40 verdeutlichen. Es sei darauf hingewiesen, dass jene drei Parameterkombinationen, die zu unregelmäßigen Schweißnähten mit einer Zugfestigkeit unter 40 % führten, aus diesen Betrachtungen ausgeschlossen worden sind. Die Stabilität dieser Verbindungen entsteht maßgeblich durch die Heftpunkte, deren Zugfestigkeit allein 10,2 % beträgt.

Tab. 2: Ergebnisse der einfaktoriellen Korrelationsanalyse für alle drei Laserparameter

Laserparameter	linearer Korrelationskoeffizient	Irrtumswahrscheinlichkeit p
Impulslänge in ms	-0,373	0,002
Spannung in V	0,043	0,73
Fokus in mm	-0,127	0,31

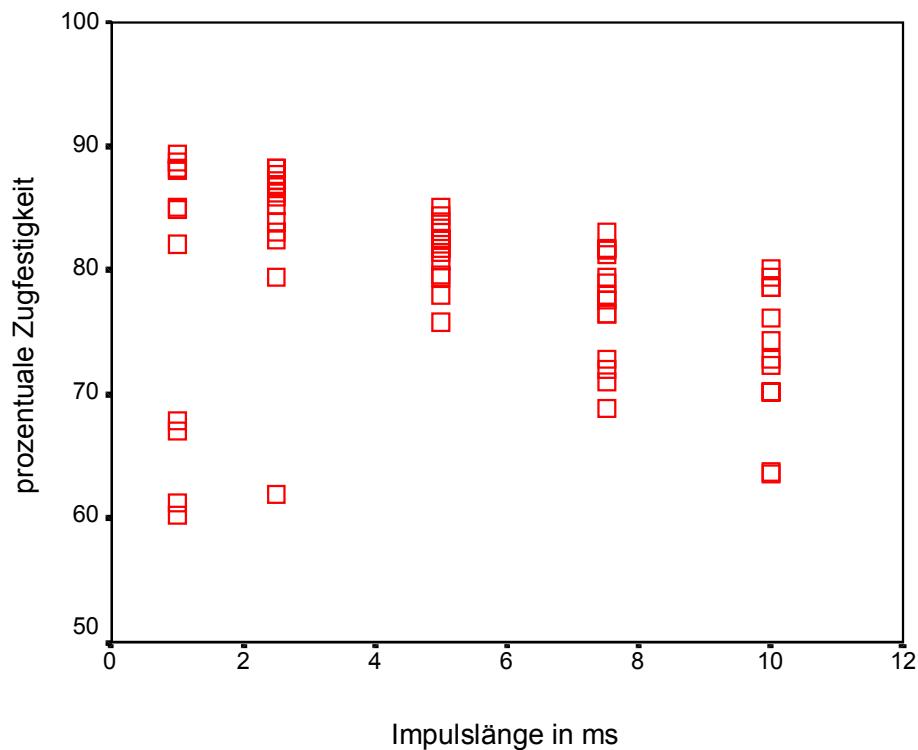


Abb. 17: Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Impulslänge bei Nichtbeachtung der Parameter Spannung und Fokus, Drahtdurchmesser: 1,0 mm

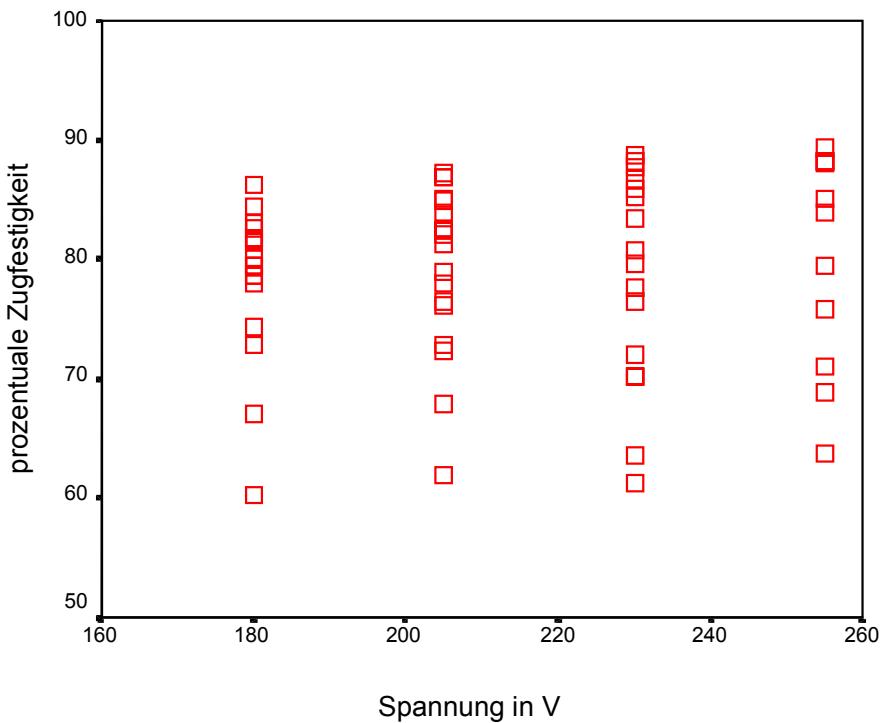


Abb. 18: Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Spannung bei Nichtbeachtung der Parameter Impulslänge und Fokus, Drahtdurchmesser: 1,0 mm

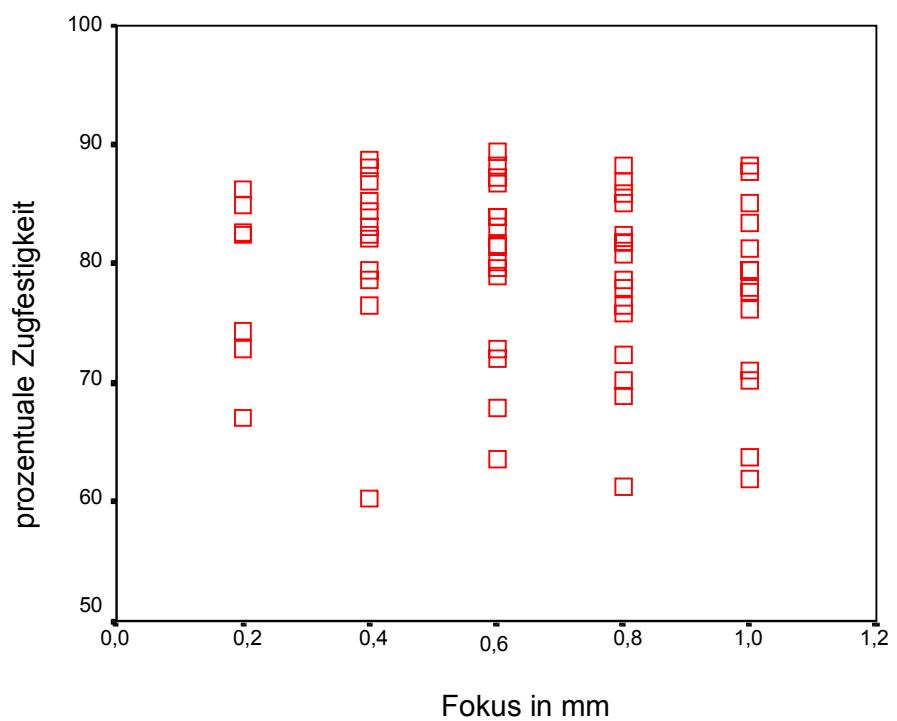


Abb. 19: Abhängigkeit der Zugfestigkeit vom Fokus bei Nichtbeachtung der Parameter Impulslänge und Spannung, Drahtdurchmesser: 1,0 mm

4.2.2 Das Zusammenwirken aller drei Laserparameter

Das Ergebnis der multifaktoriellen Regressionsanalyse zur Kontrolle der gemeinsamen Wirkung aller drei Laserparameter ist in der Tabelle 3 dargestellt.

Tab.3: Ergebnisse der multifaktoriellen Regressionsanalyse

Laserparameter	lin. Regressionskoeffizient	Irrtumswahrscheinlichkeit p
Impulslänge in ms	-0,879	0,005
Spannung in V	-0,007	0,8
Fokus in mm	-0,339	0,9
Konstante	85,594	/

Auch bei gleichzeitiger Betrachtung aller drei Laserparameter übt lediglich die Impulslänge einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit aus (Irrtumswahrscheinlichkeit $p = 0,005$). Mit Hilfe der berechneten Koeffizienten lässt sich eine durchschnittliche Zugfestigkeit wie folgt vorhersagen:

$$\text{Prozent. Zugfestigkeit} = -0,879 \times \text{IPL} - 0,007 \times \text{Spannung} - 0,339 \times \text{Fokus} + 85,594.$$

Diese Gleichung liefert Schätzwerte auf der Grundlage der in dieser Arbeit genutzten Laserparameter.

Fasst man die ermittelten Zugfestigkeiten in Abhängigkeit von den zugrundeliegenden drei Laserparametern noch einmal zusammen, ergibt sich eine Übersicht wie in Tabelle 4 auf Seite 42 gezeigt. Darin sind die gemessenen Zugfestigkeiten klassifiziert worden. Die Höhe der Zugfestigkeit bildet jeweils den farblichen Hintergrund der Laserparameterkombinationen. Die Qualität der Oberfläche wurde in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.

Tab. 4 : Übersicht über alle Parameterkombinationen und Klassifizierung der resultierenden Schweißverbindungen an Hand der Zugfestigkeit, Drahtdurchmesser: 1,0 mm

		Fokus in mm										
		0,2		0,4		0,6		0,8		1,0		
Impulslänge in ms	1,0	180	205	180	205	180	205	180	205	180	205	
		230	255	230	255	230	255	230	255	230	255	
	2,5	180	205	180	205	180	205	180	205	180	205	
		230	255	230	255	230	255	230	255	230	255	
	5,0	180	205	180	205	180	205	180	205	180	205	
		230	255	230	255	230	255	230	255	230	255	
	7,5	180	205	180	205	180	205	180	205	180	205	
		230	255	230	255	230	255	230	255	230	255	
	10,0	180	205	180	205	180	205	180	205	180	205	
		230	255	230	255	230	255	230	255	230	255	
Erläuter.: 180 Angabe der Spannung in V												
 Zugfestigkeit $\geq 85\%$  Zugfestigkeit $< 60\%$												
 Zugfestigkeit $80\% \leq x < 85\%$  keine Verbindung												
 Zugfestigkeit $60\% \leq x < 80\%$  Materialschädigung - keine Zugfestigkeitsprüfung												

Folgende sechs Gruppen zur Klassifizierung der entstandenen Schweißverbindungen wurden gebildet:

1. Die gewünschte Festigkeit von mindestens 85 % des Ausgangsdrahtes wurde mit 17 Parameterkombinationen erzielt.
2. Zwischen 80 % und 85 % der Ausgangsfestigkeit lagen die Ergebnisse bei 18 weiteren Parameterkombinationen.
3. Zugfestigkeiten zwischen 60 % und 80 % konnten mit 31 Parameterkombinationen erzielt werden.

4. Unter 60 % lag die Zugfestigkeit bei drei Parameterkombinationen. Sie erreichten lediglich Festigkeiten zwischen 20,5 % und 37,3 %. Bei diesen Prüfkörpergruppen konnte keine vollständige Schweißnaht gebildet werden. Die Verbindungen sind nahezu ausschließlich auf die Heftpunkte zurückzuführen.
5. Bei weiteren sechs Parameterkombinationen konnten aufgrund fehlender Verbindungen der Drähte keine Zerreißproben durchgeführt werden, da mit Ausnahme der Fixierungspunkte keine Verschmelzungen des Materials sichtbar waren.
6. Jene Proben, die eine Schädigung des Materials in Form einer Oberflächenoxidation bis hin zu Verkohlungen und Bohreffekten aufwiesen, wurden keiner Zugfestigkeitsprüfung unterzogen. Dieser Fall trat bei 25 der insgesamt 100 möglichen Parameterkombinationen auf.

Aus Tabelle 4 ist zu erkennen, dass vor allem bei hohen Spannungswerten in Kombination mit langen Impulsen und kleinen Laserstrahldurchmessern eine Schädigung bzw. Zerstörung des Materials auftrat. Bei geringen Spannungen, kurzen Laserimpulsen und großem Fokus konnten keine Verbindungen hergestellt werden.

Des Weiteren ist festzustellen, dass für die Spannung und den Laserstrahldurchmesser Bereiche existieren, in denen Änderungen dieser Parameter die Zugfestigkeit nicht nachhaltig beeinflussen. Beispiele dafür geben die Diagramme in den Abbildungen 20 und 21 wieder. So kann bei einer Spannung von 205 V und einer Impulslänge von 2,5 ms der Fokus zwischen 0,4 und 0,8 mm variiert werden, um Festigkeiten von rund 87% zu erzielen. Wie die Abbildung 21 zeigt, ist es möglich, bei einem Fokus von 0,4 mm und Impulsen von 1,0 ms Länge die Spannung von 230 V auf 255 V zu erhöhen, ohne die Zugfestigkeit nachhaltig zu verändern.

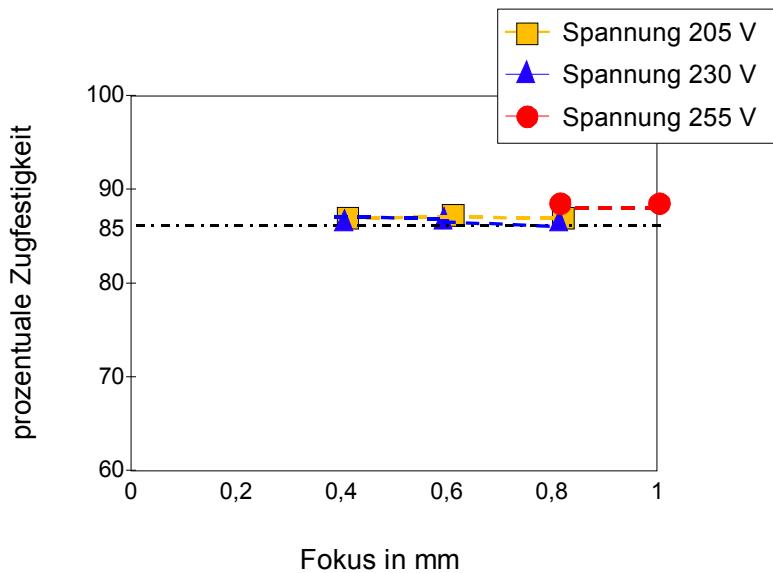


Abb. 20: Variation des Fokus bei Konstanz von Impulslänge (2,5 ms) und Spannung mit nahezu gleichbleibender Zugfestigkeit, Drahtdurchmesser: 1,0 mm;

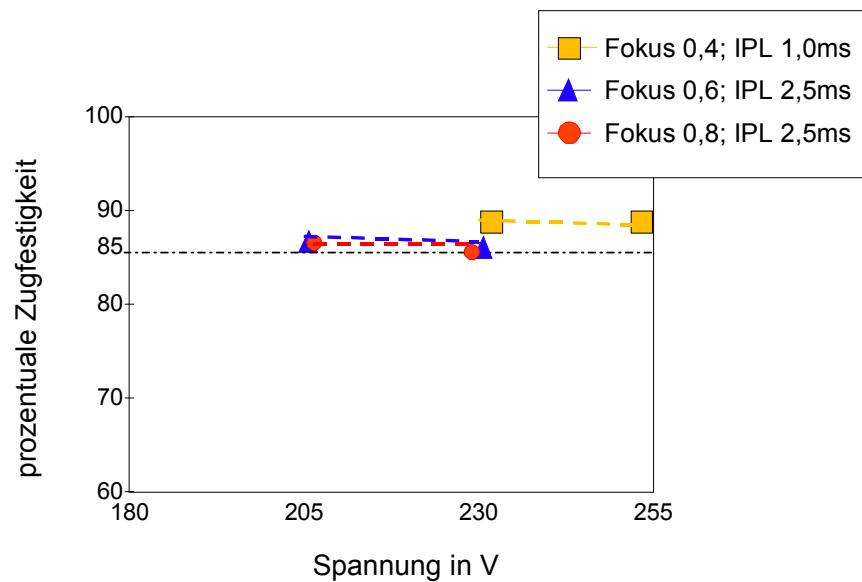


Abb. 21: Variation der Spannung bei Konstanz von Impulslänge und Fokus mit nahezu gleichbleibender Zugfestigkeit, Drahtdurchmesser: 1,0 mm; IPL= Impulslänge

Fasst man all jene Laserparameter zusammen, die zu einer Zugfestigkeit von mindestens 85 % des Ausgangsdrahtes führen, ergibt sich das in Abbildung 22 gezeigte Diagramm. Dabei ist die Dominanz der kurzen Laserimpulse (1,0 ms und 2,5 ms) zu erkennen. Zu beachten ist, dass 3 Laserparameterkombinationen, welche die geforderte Zugfestigkeit zwar erfüllt haben, aber eine unregelmäßige Schweißnaht aufwiesen, nicht in diese Darstellung aufgenommen worden sind.

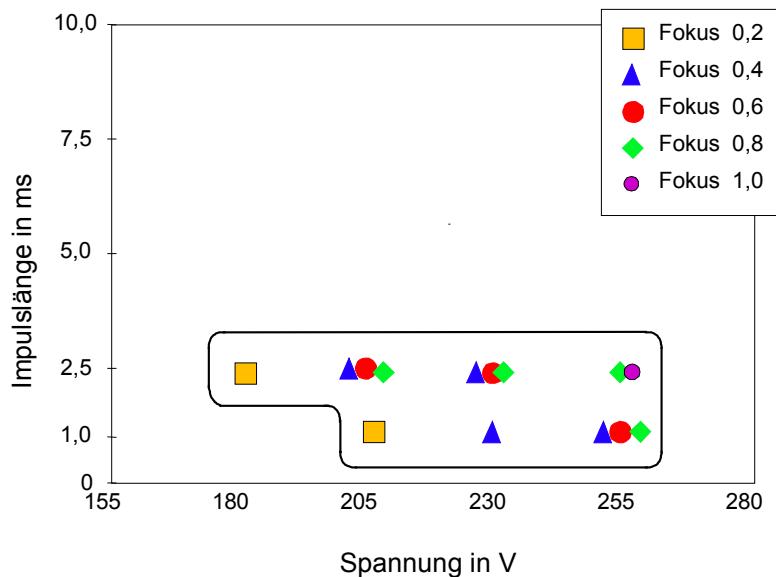


Abb. 22: Zusammenstellung der Parameterkombinationen, die zu einer Festigkeit $\geq 85\%$ des Ausgangsdrahtes führen bei gleichzeitig guter Oberflächenqualität der Schweißverbindungen, Drahtdurchmesser: 1,0 mm

4.3 Die Lokalisation der Bruchstelle und der Einfluss der Laserparameter

Im Anschluss an die Zugfestigkeitsprüfung wurden die Prüfkörper nach der Lage der Bruchstelle geordnet. Folgende drei Gruppen sind gebildet worden:

1. Alle 5 Prüfkörper einer Laserparameterkombination brachen außerhalb der Schweißnaht. Diese Erscheinung trat bei 45 Laserparameterkombinationen auf.
2. Bei 14 Laserparameterkombinationen versagte die Schweißnaht selbst.
3. Die dritte Gruppe wird von 10 Prüfkörpereinheiten gebildet, deren Bruchverhalten nicht einheitlich war. Von den je 5 Prüfkörpern einer bestimmten Laserparameterkombination versagten einige Prüfkörper innerhalb der Schweißnaht, andere brachen außerhalb.

Mit Hilfe des Chi-Quadrat-Tests ist untersucht worden, ob zwischen den eingesetzten Laserparametern und der Lage der Bruchstelle ein Zusammenhang besteht. Demzufolge hat lediglich die Spannung einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Lage des Bruches während der Zugfestigkeitsprüfung (Irrtumswahrscheinlichkeit $p = 0,01$). Für die Impulslänge und den Fokus konnte dieser Zusammenhang nicht nachgewiesen werden ($p = 0,06$ bzw. $0,78$).

Die prozentuale Verteilung der Bruchlokalisation in Abhängigkeit von der Spannung zeigt das Diagramm in Abbildung 23. 92 % der mit einer Spannung von 255 V hergestellten Verbindungen brechen außerhalb der Schweißnaht. Die restlichen 8 % versagen innerhalb der Schweißnaht. Bei einer Spannung von 180 V besteht ein umgekehrtes Verhältnis. Dabei geben 41 % der Probekörper innerhalb und nur 27 % außerhalb der Schweißnaht nach.

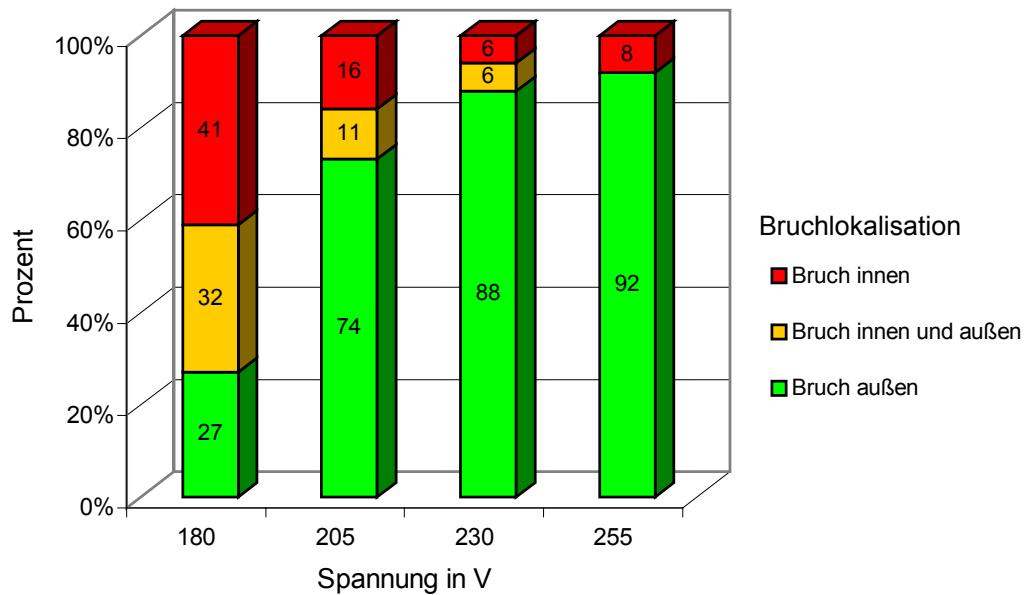


Abb. 23: Prozentuale Verteilung der Lage der Bruchstellen in Abhängigkeit von der Spannung

Die entsprechenden Diagramme für die beiden Laserparameter Impulslänge und Fokus zeigen die Abbildungen 24 und 25.

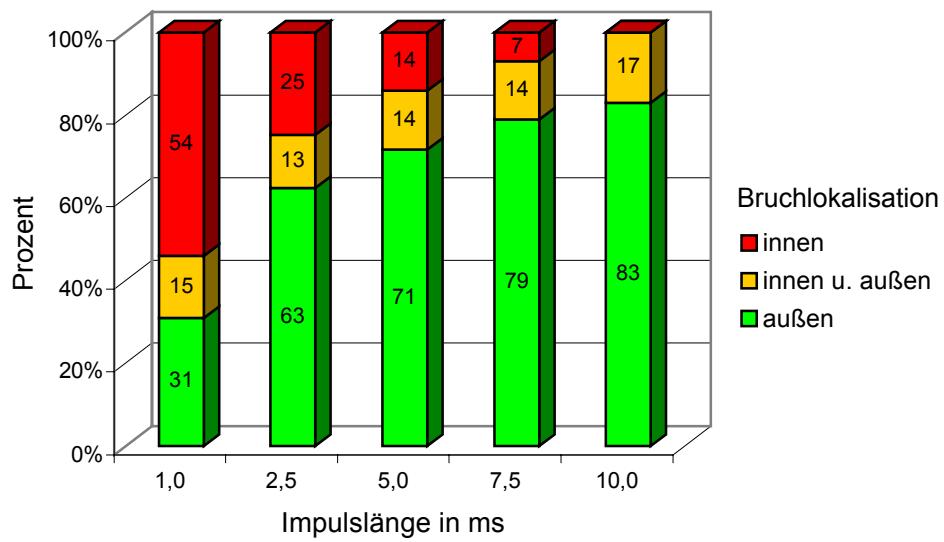


Abb. 24: Prozentuale Verteilung der Bruchstellen in Abhängigkeit von der Impulslänge

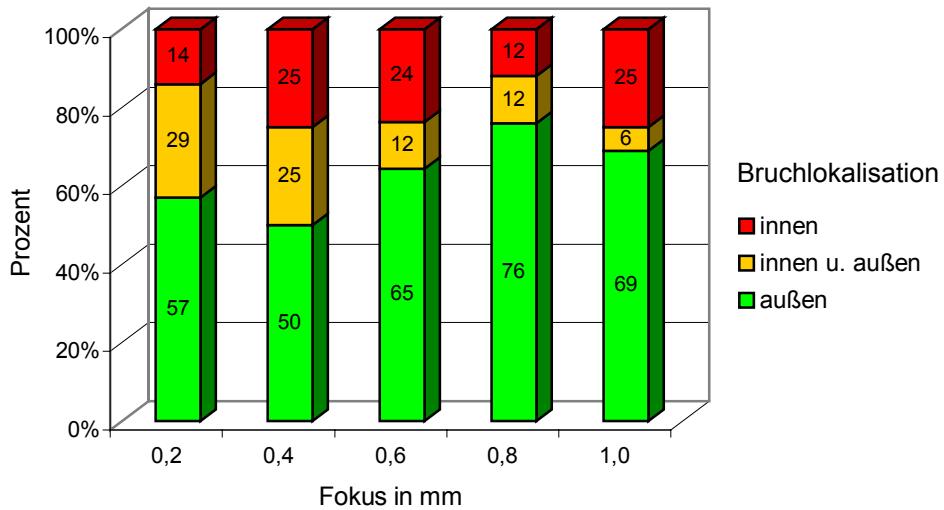


Abb. 25: Prozentuale Verteilung der Bruchstellen in Abhängigkeit vom Fokus

Mit Hilfe des H-Tests nach Kruskal-Wallis konnte nachgewiesen werden, dass sich die drei Gruppen der Bruchlokalisation hinsichtlich ihrer Zugfestigkeiten statistisch signifikant unterscheiden (Irrtumswahrscheinlichkeit $p = 0,05$). Zur genaueren Differenzierung wurden die Gruppen einzeln miteinander verglichen. Die Ergebnisse des U-Tests nach Mann und Whitney sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Tab. 5: Ergebnis des U-Tests nach Mann und Whitney

Testgruppen			Signifikanz
außen	vs.	innen/außen	0,14
außen	vs.	innen	0,002
außen/innen	vs.	innen	0,001

Demzufolge unterscheidet sich die Gruppe mit einem Bruch innerhalb der Schweißnaht von der Gruppe mit einem Bruch außerhalb der Schweißnaht bzw. der Gruppe mit einem uneinheitlichen Bruchverhalten nach multipler Bonferronikorrektur signifikant. In der Abbildung 26 ist dieser Sachverhalt unter Angabe des Medians der Zugfestigkeiten graphisch dargestellt.

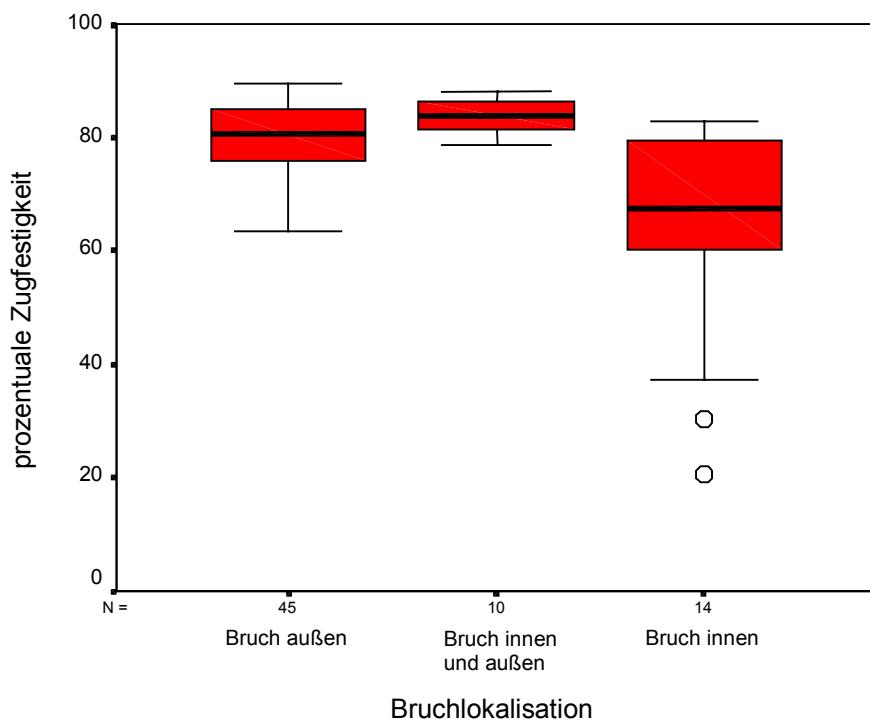


Abb.26: Verteilung der Zugfestigkeitswerte in Abhängigkeit von der Lage des Bruches

Zwischen der Oberflächenqualität (vereinfachend unterteilt in „gut“ und „schlecht“) und der Lokalisation der Bruchstelle existiert bei dieser Klassifikation kein Zusammenhang. Unterteilt man die Oberflächenmerkmale jedoch in drei Gruppen (blank, unregelmäßig, verfärbt), ist laut Abbildung 27 ein Zusammenhang zu vermuten. Die Prüfung mit dem Chi-Quadrat-Test ergab statistische Signifikanz (Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0,0001$). Während 96 % der Verbindungen mit Anlauffarben (Draht verfärbt) außerhalb der Schweißnaht brechen, versagen 70 % der Verbindungen mit einer unregelmäßigen

Schweißnaht innerhalb der Fügezone. Bei den blanken Schweißverbindungen versagen 61 % außerhalb der Schweißnaht und 16 % innerhalb der Schweißnaht. Die restlichen 23 % zeigen kein einheitliches Bruchverhalten.

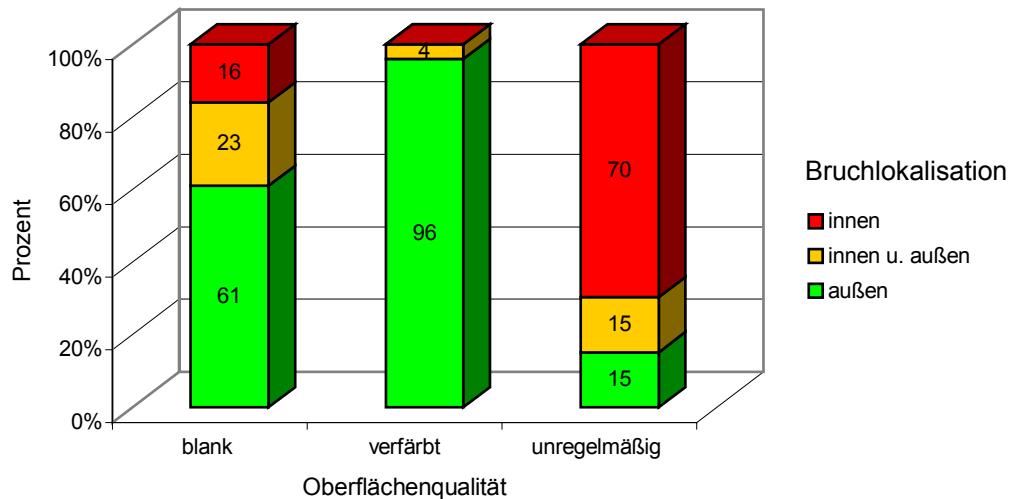


Abb. 27: Prozentuale Verteilung der Lokalisation der Bruchstelle auf die Oberflächenqualitäten

Diese Abbildung lässt vermuten, dass ein Bruch außerhalb der Schweißnaht generell auf eine hohe Stabilität der Verbindung hinweist. Das ist jedoch auszuschließen, da bei den außerhalb der Schweißnaht gebrochenen Verbindungen eine größere Streuung der Zugfestigkeitswerte zu verzeichnen war, als bei den Verbindungen mit einem uneinheitlichen Bruchverhalten. Die Lokalisation der Bruchstelle ist demzufolge als alleiniges Qualitätskriterium für die Zugfestigkeit einer Verbindung nicht zu empfehlen.

Die bisher für Drähte mit einem Durchmesser von 1,0 mm beschriebenen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Mit 17 der 100 möglichen Laserparameterkombinationen konnten Zugfestigkeiten von mindestens 85% der Ausgangsdrähte hergestellt werden. Von diesen wiesen 14 Verbindungen eine blanke und regelmäßige Schweißnaht auf, 3 waren durch eine unregelmäßige Schweißnaht gekennzeichnet.

Sowohl die Höhe der Zugfestigkeit als auch die Ausprägung der Oberfläche der geschweißten Verbindungen werden statistisch signifikant von der Impulslänge beeinflusst. Verbindungen mit einer fehlerfreien Oberfläche erzielten im Durchschnitt signifikant höhere Zugfestigkeiten als Verbindungen mit einer unregelmäßigen Schweißnaht oder Verfärbungen im Randbereich der Schweißzone. Letzteres Merkmal tritt auch am Ende der Überlappungszone der Drähte auf. Eine Schädigung des einzelnen Drahtes außerhalb der Überlappungszone ist demzufolge zu vermuten. Die

69 gezogenen Prüfkörpergruppen versagten im Zugversuch an verschiedenen Stellen. Dabei konnten drei Gruppen unterschieden werden. Die Höhe der Zugfestigkeit ist bei Verbindungen, die innerhalb der Schweißnaht gebrochen sind, statistisch signifikant kleiner als bei den Verbindungen, bei denen mindestens ein Prüfkörper außerhalb der Schweißnaht gerissen ist. Auf die Lokalisation der Bruchstelle nimmt lediglich die Spannung Einfluss.

Mit hoher Sicherheit erhält man Verbindungen mit einer blanken und regelmäßigen Schweißnaht und einer relativen Zugfestigkeit von mindestens 85 % des Ausgangsdrahtes bei der hier gewählten Fügekonstruktion mit einer Impulslänge von 2,5 ms, einer Spannung zwischen 205 V und 230 V sowie einem Fokus zwischen 0,4 mm und 0,8 mm. Wird ein Laserparameter auf einen Wert außerhalb dieser Grenzen verändert, muss mindestens ein weiterer Laserparameter korrigiert werden.

4.4 Zugfestigkeitsergebnisse für die Drahtstärke 0,7 mm und 0,8 mm

Diese Drähte wurden zum Vergleich der erreichbaren Zugfestigkeiten unter Kenntnis der Laserparameterwirkung bei einer Drahtstärke von 1,0 mm mit einer geringeren Anzahl an Parameterkombinationen geschweißt. Die Wahl der Impulslänge fiel in Anlehnung an die guten Ergebnisse bei den Drähten 1,0 mm ohne weitere Veränderung auf 2,5 ms. Unter Berücksichtigung der reduzierten Drahtdurchmesser erfolgte die Variation der Spannung beginnend bei 170 V über 180 V und 205 V bis auf 230 V. Für den Laserstrahldurchmesser wurde der mittlere Wert 0,6 mm gewählt. Die erzielten relativen Zugfestigkeiten enthält Tabelle 6.

Tab. 6: Prozentuale Zugfestigkeit der Drähte mit kleinerem Durchmesser (0,7 mm; 0,8 mm); konstante Schweißparameter: Fokus 0,6 mm; Impulslänge 2,5 ms

Durchmesser 0,7 mm		Durchmesser 0,8 mm	
Spannung in V	Zugfestigkeit in %	Spannung in V	Zugfestigkeit in %
170	88,5	170	88,2
180	86,7	180	89,6
205	81,9	205	87,0
230	76,2	230	79,1

Zum Vergleich wurden diese Ergebnisse unter Einbeziehung der Drahtstärke 1,0 mm graphisch dargestellt (Abb. 28). Die Maximalwerte der ermittelten prozentualen Zugfestigkeiten stimmt mit denen des Drahtes 1,0 mm nahezu überein. Sie werden jedoch bei unterschiedlichen Spannungswerten erreicht. Je dünner der Draht ist, desto geringer sollte die Spannung gewählt werden. Ausgehend von dem optimalen Wert ist auch bei diesen beiden Drahtstärken ein Abfall der Zugfestigkeit mit zunehmender Spannung zu verzeichnen.

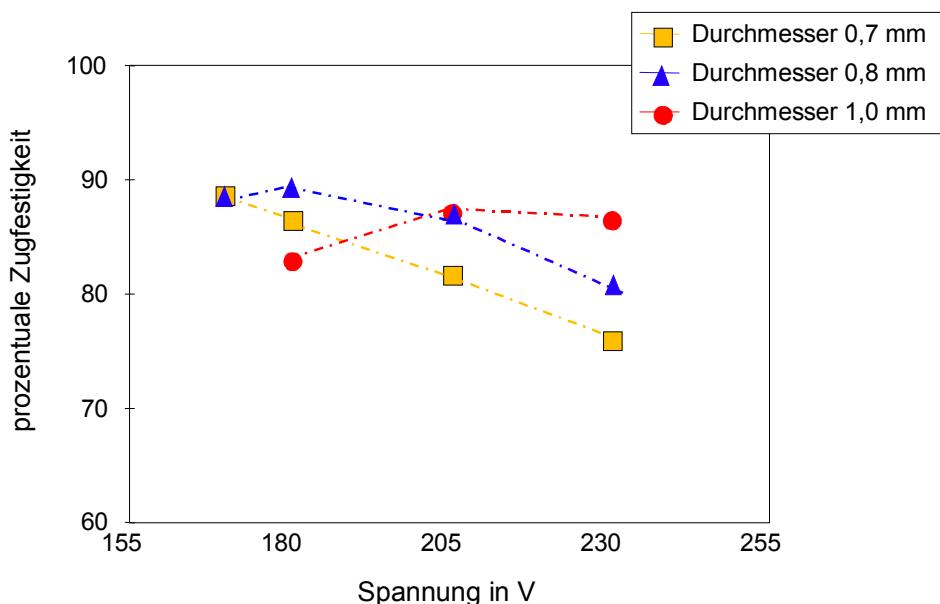


Abb. 28: Vergleich der Zugfestigkeiten der Drahtstärke 0,7 mm, 0,8 mm sowie 1,0 mm in Abhängigkeit von der Spannung bei der Impulslänge 2,5 ms und dem Fokus 0,6 mm

4.5 Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen

Nach der in Abschnitt 3.8 geschilderten Methode kann die Gefügeausbildung der Schweißverbindungen im Querschnitt deutlich gemacht werden. In den Übersichtsbildern stellt sich die Verbindungszone zwischen beiden Drähten gemäß Abbildung 29 dar.

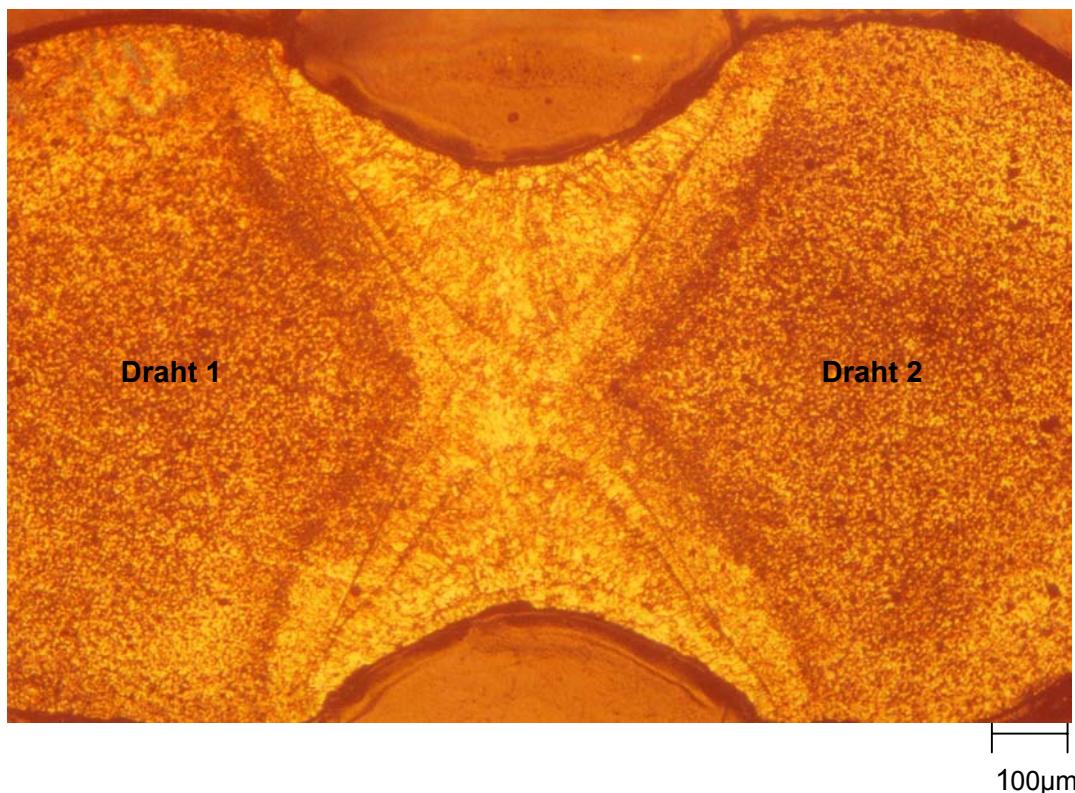
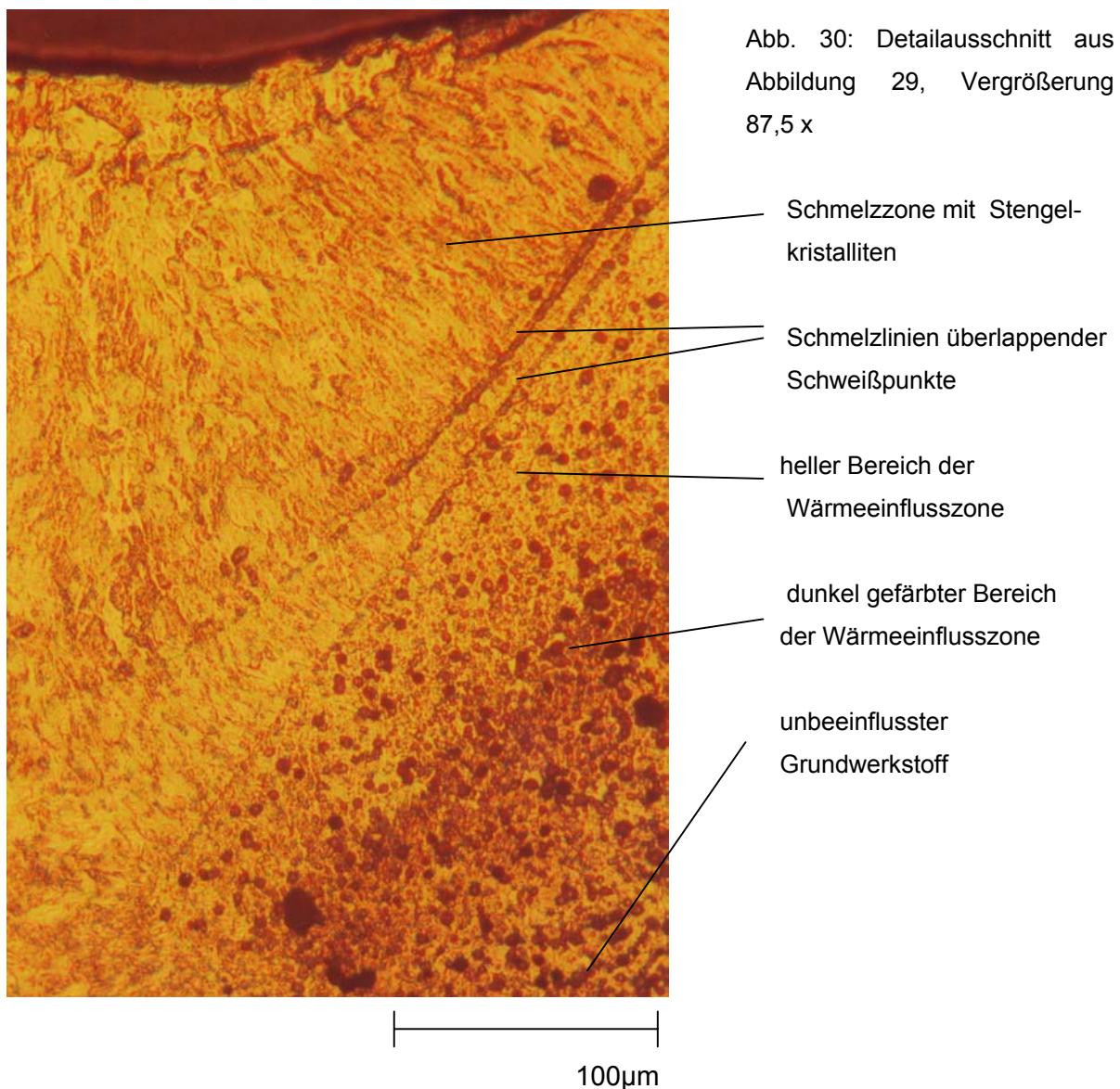


Abb. 29: Querschnitt einer Schweißverbindung (0,4 mm Fokus, 205 V, 2,5 ms); Drahtdurchmesser: 1,0 mm, prozentuale Zugfestigkeit: 86,90 %, Oberfläche: blank, Bruch: innen und außen, Zustand nach Ätzung, Darstellung im Mikroskop „Neophot 2“ (Fa. Carl-Zeiss, Jena, D), Vergrößerung: 22 x

Die Schweißpunkte erkennt man im Querschnitt als Anschnitt eines Kegels mit abgerundeter Spitze. Durch Überlappung oder Berührung der Kegelspitzen beider Lagen erhält die Schweißnaht eine sanduhrförmige Gestalt. Sie wird von dem benachbarten Gefüge durch eine feine, aber deutlich sichtbare Linie getrennt. An die Schweißnaht schließt sich eine Übergangszone an, welche aus zwei Bereichen besteht: einer helleren, wenig strukturierten Zone sowie einer dunkel dargestellten, strukturierten Zone. An diese grenzt das Gebiet des unveränderten Grundgefüges. Teilweise sind mehrere Schweißlagen zu erkennen, was auf die enge Überlappung der Schweißpunkte zurückzuführen ist.

Bei stärkerer Vergrößerung sind diese Details deutlicher zu erkennen, wie die Abbildung 30 zeigt.



Die sich im rechten Bildteil darstellenden perl schnurartigen Linien begrenzen die einzelnen Schweißpunkte. Das Gefüge der Schmelzzone ähnelt dem eines Gussgefüges. Die Stengelkristallite orientieren sich in diesem Beispiel zur Oberfläche des Schweißpunktes.

Diese Grundform der Schweißnaht wird durch die Höhe der eingebrachten Energie in ihrer Ausprägung variiert. In Abbildung 31 ist der Querschnitt einer unregelmäßigen Schweißnaht dargestellt, deren Festigkeit 67,90 % beträgt.

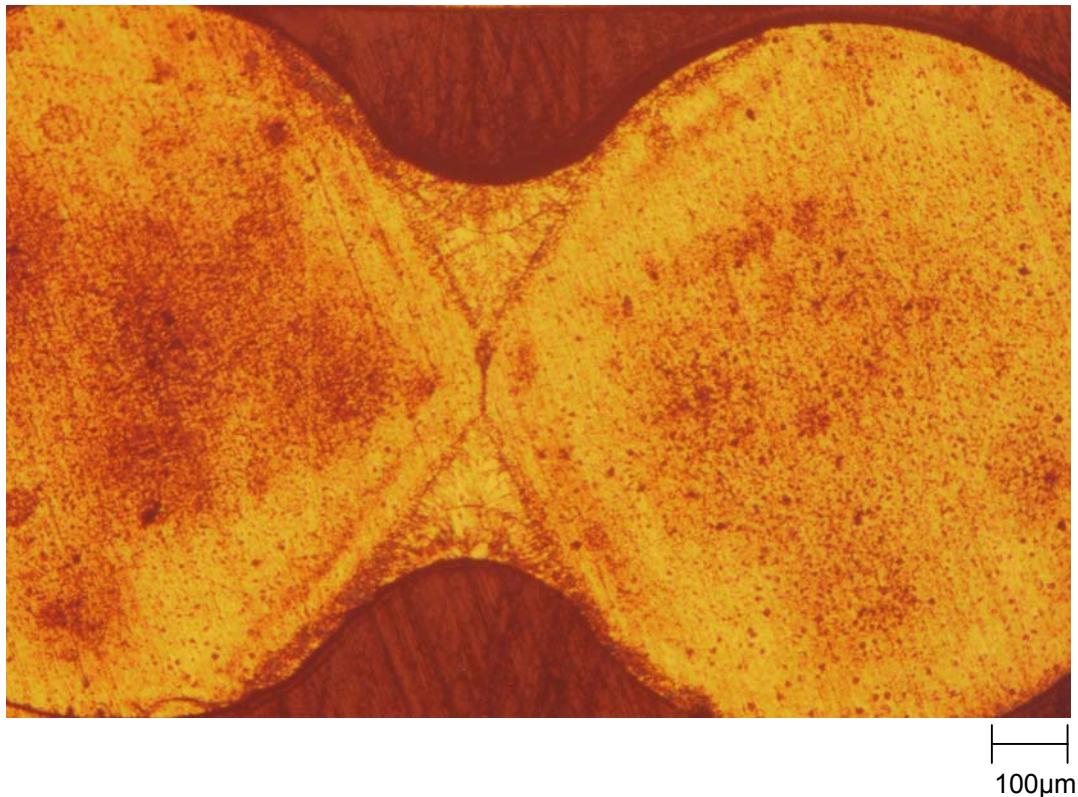


Abb. 31: Querschnitt einer unregelmäßigen Schweißnaht (0,6 mm Fokus, 205 V, 1,0 ms),
 Drahtdurchmesser: 1,0 mm, prozentuale Zugfestigkeit: 67,90 %, Bruch: innen,
 Zustand nach Ätzung, Darstellung im Mikroskop „Neophot 2“ (Fa. Carl-Zeiss, Jena, D),
 Vergrößerung: 22 x

Im Gegensatz zu der Abbildung 29 ist die geringere Dimension dieser Schweißnaht auffällig. Des Weiteren fehlt die zentrale Überlappung der Schweißkegel beider Lagen. Zwischen beiden Kegelspitzen ist die ursprüngliche Berührungsfläche der zwei Drähte noch zu erkennen, wie auch die Abbildung 32 auf der folgenden Seite zeigt. Die Drähte wurden demzufolge in diesem Bereich nicht vollständig aufgeschmolzen. Allerdings sind auch in dieser Verbindung die Stengelkristallite innerhalb der Schweißnaht zu finden. Die Wärmeeinflusszone weist eine geringe Ausdehnung auf.

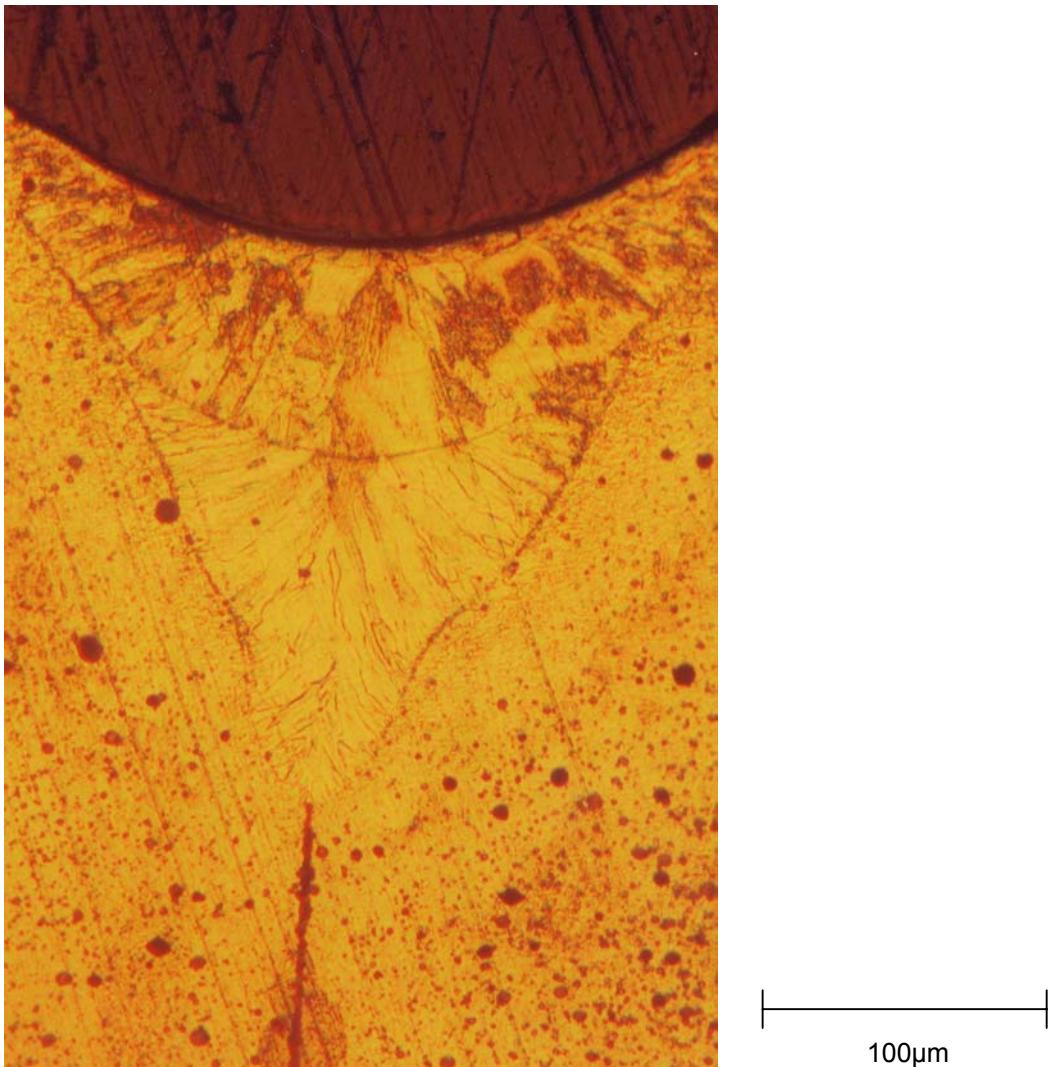


Abb. 32: Vergrößerte Darstellung des oberen Schweißkegels aus Abbildung 31, Übergangszone kaum zu erkennen, unveränderte Berührungsfläche der beiden Drähte im unteren Teil des Bildes, Vergrößerung: 87,5 x

Im Beispiel des Anschliffes einer verkohlten Verbindung in den Abbildungen 33 und 34 tritt die Wärmeeinflusszone deutlich hervor. Vor allem im zentralen Anteil der Schweißnaht, vermutlich im Bereich der Kegelspitze der ersten Lage, ist der dunklere Anteil der Wärmeeinflusszone stark ausgeprägt. Der Schweißkegel der sogenannten Gegenlage nimmt die gesamte Tiefe der Schweißnaht ein, wobei er an der nach unten orientierten Oberfläche eine kraterartige Struktur aufweist. Ein Materialverlust durch Verdampfung oder Verkohlung ist nicht auszuschließen. Anteile der Schmelze der ersten Lage sind lediglich im unteren Bereich noch zu erkennen. Während die Stengelkristalle der Schweißnaht in der Abbildung 32 primär zur Oberfläche gerichtet sind, orientieren sie sich in der Abbildung 33 zur Schweißnahtmitte.

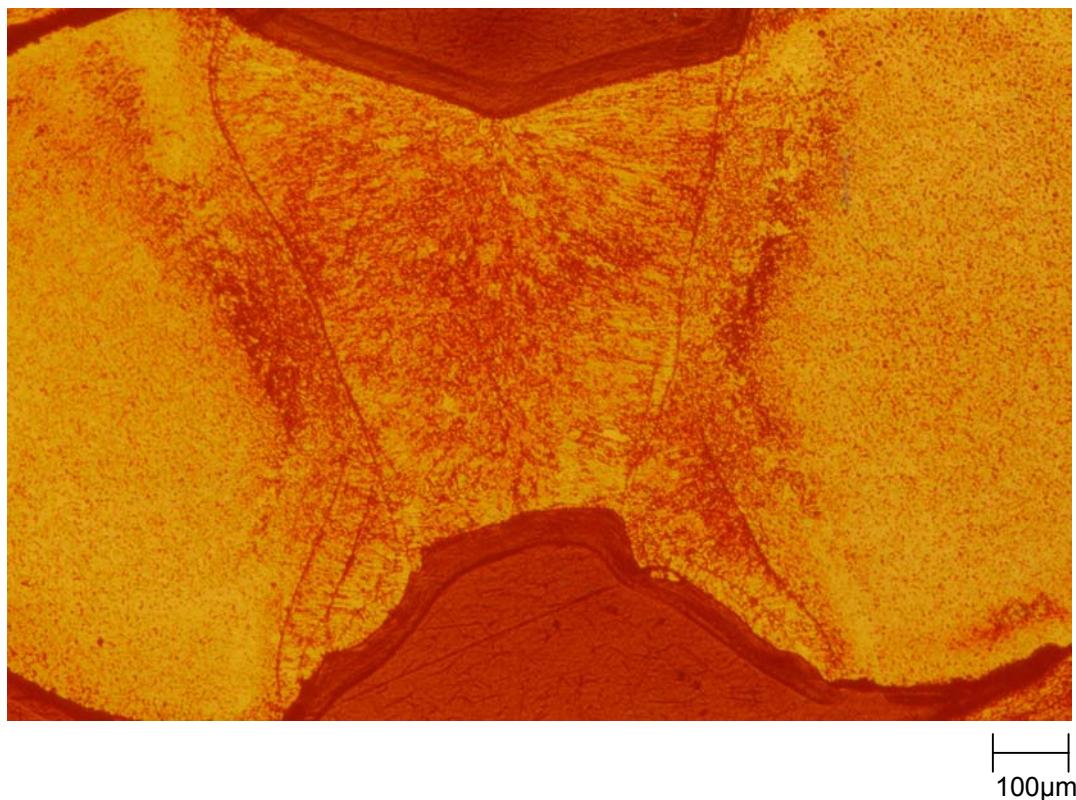


Abb. 33: Querschnitt einer verkohlten Schweißverbindung (0,4 mm Fokus, 255 V, 2,5 ms);
Drahtdurchmesser: 1,0 mm, keine Zugfestigkeitsprüfung, Zustand nach Ätzung,
Darstellung im Mikroskop „Neophot 2“ (Fa. Carl-Zeiss, Jena, D), Vergrößerung: 22 x

Ein vergrößerter Ausschnitt aus dem linken oberen Bildanteil (Abb. 34) weist auch bei dieser Schweißverbindung die Stengelkristalle der Schweißnaht, die perlchnurartige Begrenzungslinie der Schmelzpunkte sowie die Bereiche der Wärmeeinflusszone nach. Allerdings zeigt sich hier eine Besonderheit dieser Übergangszone. Der dunklere Anteil der Wärmeeinflusszone ist nicht nur grob in seiner Struktur, sondern scheint auch eine gewisse Orientierung der Kristalle aufzuweisen. Diese sind zur Schweißnaht gerichtet.

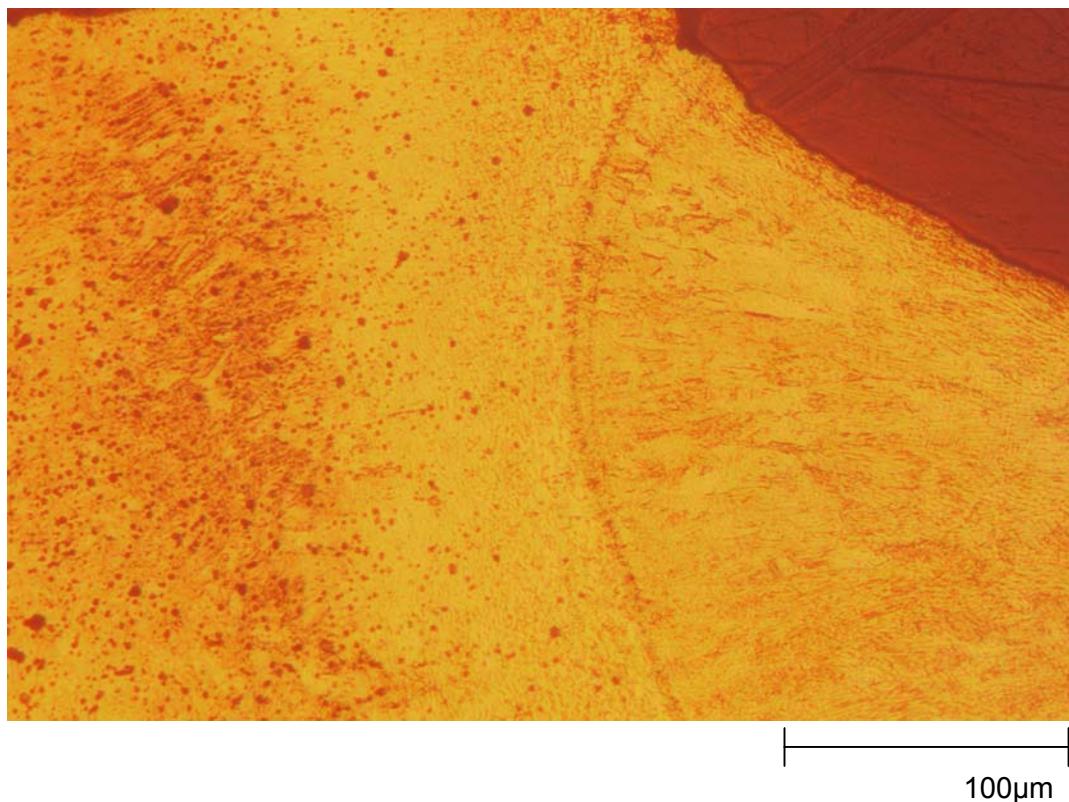


Abb. 34: Vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 33, Darstellung der Schweißnaht und der angrenzenden Wärmeeinflusszone, Vergrößerung: 87,5 x

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in allen untersuchten Proben folgende charakteristischen Gefügeausprägungen nachgewiesen werden konnten: im Bereich der eigentlichen Schweißnaht das Primärgefüge, welches einem Gussgefüge ähnelt, die sich nach beiden Seiten ausbildende Wärmeeinflusszone sowie beidseitig der unveränderte Grundwerkstoff. Die Form und Größe dieser Strukturen wird maßgeblich durch die Laserparameterkombinationen bestimmt.

5 Diskussion

Mit der Einführung des Lasers in die zahntechnischen Laboratorien ist eine Vielzahl von dentalen Legierungen auf ihre Laserschweißbarkeit, die damit zu erreichenden Festigkeitswerte und die entstehenden Gefügeänderungen untersucht worden. Dabei standen vor allem die Gusslegierungen im Mittelpunkt des Interesses, wobei unter anderem geprüft wurde, ob eine lasergeschweißte Verbindung die gleiche Festigkeit erzielen kann wie die bis dahin favorisierte Lötung. In Abhängigkeit von der konstruktiven Gestaltung und der Legierungszusammensetzung der Probekörper wurden zu dieser Fragestellung unterschiedliche Aussagen getroffen. Dennoch wird von der Mehrzahl der Autoren der Vorteil der Laserschweißung aufgrund der höheren Korrosionsbeständigkeit und der besseren Biokompatibilität betont (KAPPERT, 1991; MOHR, 1991; SCHWARZ, 1992). Aus diesem Grund ist in der hier vorliegenden Arbeit auf eine vergleichende Untersuchung entsprechender Lötverbindungen verzichtet worden.

Im Gegensatz zu der großen Auswahl von Veröffentlichungen über das Schweißen von Gusslegierungen gibt es wenig Publikationen zum Laserschweißen kieferorthopädisch genutzter Drähte, obwohl die Schweißbarkeit verschiedener Edelstähle nachgewiesen ist. Die Erfahrungen und Erkenntnisse, die aus dem Schweißen von Gusslegierungen gewonnen wurden, können nicht unverändert auf diese Materialgruppe übertragen werden. Diese Tatsache ist durch die unterschiedlichen Werkstoffzusammensetzungen, Probekörperformen und Probekörpergrößen sowie die differierenden Nahtgeometrien bedingt. Der Arbeitsprozess des Schweißens ist jedoch nicht nur von der Legierungsart und der Werkstückform abhängig, sondern unter anderem auch von den im Folgenden erläuterten Begleitbedingungen.

5.1 Kritische Wertung der Methodik

Entsprechend den Forderungen nach anlauffarbenfreien Schweißverbindungen wurde unter einer Schutzgasatmosphäre gearbeitet, da auf diese Weise die Schmelze vor einer Reaktion mit der umgebenden Luft geschützt werden kann. Ebenso leistet der Schutzgasstrom einen Beitrag zur Kühlung der Schmelze und des Werkstoffes. Abweichend von der zahntechnischen Praxis wurde auf ein Gipsmodell als Unterlage verzichtet. Die Drähte sind zur stabilen und spaltfreien Positionierung durch zwei Klemmbacken fixiert worden. Im Schweißnahtbereich hatten sie keinen Kontakt zur Unterlage. Diese Anordnung könnte im Vergleich mit dem Vorgehen in der

kieferorthopädischen Technik zu einem veränderten Schutzgasstrom im Bereich der Schweißnaht führen. In beiden Anordnungen ist der Schutzgasstrom auf die Targetfläche gerichtet. Bei der „freischwebenden“ Variante der hier vorliegenden Arbeit könnte ein Teil des Schutzgases auch die Unterseite der Verbindungszone umspült haben. Andererseits verhindert eine Gipsunterlage das Abströmen des Gases in die Umgebung, so dass der Argonstrom auf die Schweißebene konzentriert ist. Es ist insgesamt davon auszugehen, dass diese Unterschiede das Schweißergebnis nicht nennenswert beeinflussen.

Über die Verwendung eines Zusatzwerkstoffes lässt sich kontrovers diskutieren. Hier wurde darauf verzichtet, da einzig die Wirkung der Laserparameter auf das Schweißergebnis untersucht werden sollte. Damit konnte eine schwer zu kalkulierende Fehlerquelle, welche die Zufuhr des Zusatzwerkstoffs darstellt, ausgeschlossen werden. Auch WOLF (2000) ermittelte bei den Laserschweißungen von Remanium® GM 380 und Remanium® 2000 ohne Zusatzmaterial weniger Fügefehler (Risse, Lunker, u.ä.) als bei den vergleichenden Schweißungen mit Zusatzmaterial.

Die Anzahl der Parameterkombinationen aus Spannung, Impulslänge und Größe des Laserstrahldurchmessers scheint nach den vorliegenden Ergebnissen zu umfangreich gewählt worden zu sein, da eine beachtliche Anzahl der Probekörper nicht in die Zugfestigkeitsuntersuchungen einbezogen werden konnte. Dies trifft vor allem für die größeren Impulslängen zu. Andererseits verlangen eine geringe Spannung und ein großer Fokus längere Impulse, um eine Verbindung herstellen zu können. Bei genauerer Betrachtung ist weiterhin zu bemerken, dass die Änderung nur eines Parameters zu einem deutlich besseren Schweißergebnis führen kann. Um diese Phänomene umfangreich darstellen zu können, war es notwendig, die Laserbetriebsgrößen in einem größeren Rahmen zu variieren. Gleichzeitig musste der Ausschluss einiger Parameterkombinationen in Kauf genommen werden. Auch ÖHLSCHLÄGER bemerkte, dass es zur Bestimmung optimaler Strahlparameter in der Regel nicht genügt, nur einen Parameter zu variieren. „Vielmehr ist es notwendig, eine geeignete Kombination aller beim Punktschweißen wesentlichen Parameter zu finden“ (ÖHLSCHLÄGER, 1986).

Eine Aussage über die Qualität eines Werkstoffes oder einer Verbindung kann man mit Hilfe der Zugfestigkeit treffen. Grundlage für deren Bestimmung ist der Zugversuch, der in der industriellen Werkstoffprüfung nach der europäischen Norm DIN EN 10 002 durchgeführt wird. Dabei sind unter anderem die Probekörpergestaltung und der Versuchsablauf festgelegt. Da in der Zahntechnik die Materialdimensionierung deutlich kleiner ist, wird der Zugversuch in diesem Bereich meist nur in Anlehnung an die genormte Version ausgeführt. Die hier gewählte Form sollte sich so weit wie möglich

an die in der Praxis vorkommenden Bedingungen anlehnen und wurde deshalb unabhängig von einer festgelegten Bestimmung gestaltet. Im Vordergrund stand die Verbindung zweier parallel zueinander liegender Drähte, wie sie unter anderem bei der Herstellung oder Reparatur einer Crozat-Apparatur benötigt wird, zum Beispiel beim Fügen des Palatalbügels oder des Crescents an die Jacksonklammer. Aus der in dieser Arbeit verwandten Schweißnahtkonfiguration resultiert auch die Tatsache, dass die Zugfestigkeit des Ausgangsdrahtes nicht direkt mit jener der Schweißverbindungen verglichen werden kann. Dieser Umstand wird durch die unterschiedliche Kraftwirkung auf die zu ziehenden Proben hervorgerufen. Während die Kraft bei einem ungeschweißten Draht axial wirkt, treten bei diesen Probekörpern im Zugversuch zusätzlich Scherkräfte auf. Es handelt sich demzufolge um einen Scherzugversuch. Bezieht man jedoch die Zerreißfestigkeit jeder Laserschweißverbindung auf die des Ausgangsmaterials, tritt dieser eigentlich als Fehler zu bezeichnende Unterschied bei allen Proben in gleichem Maße auf und ist somit bei dem Vergleich der relativen Zugfestigkeitswerte und der Quantifizierung des Laserparametereinflusses zu vernachlässigen. Des Weiteren wiesen die Ausgangsdrähte minimale Unterschiede in ihrem Durchmesser auf. Durch die Umrechnung der gemessenen Zugfestigkeit auf die Zugfestigkeit des jeweiligen Ausgangsdrahtes konnte eine weitere Fehlerquelle ausgeschlossen werden.

Die prozentuale Zugfestigkeit von 85 % als Qualitätskriterium für stabile Verbindungen wurde willkürlich festgelegt. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass auch Verbindungen mit einer prozentualen Zugfestigkeit von 80 % den klinischen Anforderungen gerecht werden.

Mittels Einteilung der Probekörper anhand der entstandenen Schweißnaht konnte untersucht werden, ob scheinbar nur an der Oberfläche ablaufende Prozesse, zum Beispiel die minimale Verfärbung der Drähte neben der Fügenaht, auch Auswirkungen auf die Gesamtstabilität der Verbindungen haben. Nach den hier vorliegenden Ergebnissen bietet demzufolge nicht nur die Schweißnaht selbst, sondern auch die unmittelbare Umgebung der Naht einen Anhaltspunkt für den Techniker, um die Qualität der von ihm gefertigten Verbindung selbst einschätzen zu können.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Laserparameter bei reduziertem Drahtdurchmesser (0,7 mm, 0,8 mm) stellen lediglich eine Ergänzung zur vorrangig untersuchten Drahtstärke 1,0 mm dar. Aus diesem Grund wurden die bereits gewonnenen Erkenntnisse zu den Laserparametern in diesem Untersuchungsteil berücksichtigt. So kamen Laserimpulse mit einer Länge von 2,5 ms und Laserstrahlen mit einem Durchmesser von 0,6 mm zum Einsatz. Vor allem die Drahtstärke 0,7 mm

ermöglicht den Vergleich der erreichten Zugfestigkeiten mit den Ergebnissen bereits veröffentlichter Untersuchungen (z.B. HOFMANN und LINDIGKEIT, 1999a).

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, diejenigen Schweißparameter zu bestimmen, die bei parallel gelagerten Drähten des Durchmessers 1,0 mm zu maximaler Zugfestigkeit führen. Bei Nutzung optimaler Parameterkombinationen wurden Werte von 89,4 % (1,0 mm Durchmesser) bzw. 88,5 % (0,7 mm Durchmesser) der Zugfestigkeit eines ungeschweißten Drahtes ermittelt. Diese Ergebnisse liegen deutlich über den von HOFMANN und LINDIGKEIT (1999a) für die Legierung Remanium® bestimmten Werten. Zur Ermittlung der größtmöglichen Festigkeit in Abhängigkeit von konstruktiven Bedingungen variierten sie die Gestaltung der Fügezone. Wie bereits erläutert, verschweißten sie die Drähte sowohl Stoß an Stoß (mit und ohne Zusatzwerkstoff) als auch mit einem parallel gelagerten Draht bzw. einem in der Kieferorthopädie genutzten Edelstahlrörchen. Bezogen auf das Ausgangsmaterial konnten sie bei Remanium® federhart mit einem Durchmesser von 0,7 mm und der Verdopplung des Querschnitts durch einen parallel verschweißten 4 mm langen artgleichen Draht eine Zugfestigkeit von 70 % des Ausgangsdrahtes bestimmen. Eine Ursache für die differierenden Festigkeiten der hier vorliegenden Arbeit zu den Ergebnissen von HOFMANN und LINDIGKEIT könnte die unterschiedliche Konfiguration der Fügestellen sein. Bei der Schweißnahtkonfiguration von HOFMANN und LINDIGKEIT (1999a) wird durch das Anfügen eines Drahtabschnittes die Verbindung nachträglich stabilisiert. Obwohl es sich in beiden Untersuchungen um eine Vergrößerung des Drahtquerschnittes und der gefügten Fläche handelt, ist die Kraftwirkung im Verlauf des Zugversuches unterschiedlich. Während bei dem zusätzlichen Anschweißen eines Drahtabschnittes die Kraftwirkung weiterhin in axialer Richtung erfolgt, treten beim Überlappstoß - wie bereits erwähnt - zusätzlich Scherkräfte auf. Der Vorteil beider Nahtkonfigurationen gegenüber einer reinen Stoß-an-Stoß-Verbindung bzw. einer Lötung liegt auf der Hand, wenn man die Ergebnisse von HOFMANN und LINDIGKEIT aus der gleichen Veröffentlichung bei einer Stoß-an-Stoß-Schweißung (32 % bzw. 42 % der Zugfestigkeit des Ausgangszustandes, abhängig von der Laserleistung) und der einer Lötung mit einem Silberstahllot (35 %) betrachtet.

Eine weitere Untersuchung an kieferorthopädisch genutzten Drähten führte LAATZ (1997) durch. Er lagerte zwei Drähte gekreuzt überlappend und verband sie mit einem

zentralen Schweißpunkt, welcher ein Anschmelzen des oberen Drahtes bewirken sollte. Während HOFMANN und LINDIGKEIT (1999a) bei allen untersuchten Drahtlegierungen mit dem Laserschweißen bessere Zugfestigkeiten erzielten als mit dem Löten, erreichte LAATZ (1997) mit dem Lötverfahren die besten Ergebnisse. Errechnet man die prozentualen Zugfestigkeiten für einen 0,9 mm starken Remanium®-Draht aus den Angaben seiner Diagramme, ergeben sich für die Lötung Festigkeiten von ca. 63 % und für die Laserschweißung ca. 38 %. Damit liegen diese Werte sowohl unter den Ergebnissen von HOFMANN und LINDIGKEIT (1999a) als auch unter den in der vorliegenden Untersuchung bestimmten Zugfestigkeiten. Das Verhältnis der Zugfestigkeitswerte hätte sich eventuell zugunsten der Laserschweißung verschoben, wenn der Kontaktspunkt beider Drähte in den Fokus des Laserstrahles geführt worden wäre. Ein einzelner Schweißpunkt ist in diesem Falle allerdings nicht ausreichend. Eventuell ermöglicht der Zusatzwerkstoff beim Löten dieser Konstruktion eine festere Verbindung, da er um beide Drähte fließt, ohne einen Draht zu schädigen oder in seinem Durchmesser zu reduzieren. Die mit dem Laserschweißen erzielten Zugfestigkeiten sind nach Meinung von LAATZ (1997) für eine praktische Anwendung nicht ausreichend. Obwohl die Festigkeitswerte der Lötverbindungen höher waren, empfahlen VAN BENTHEM UND LAATZ (1997) aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Legierungen auf das Löten zu verzichten, da die Biokompatibilität negativ beeinflusst wird.

Weitere Untersuchungen beschäftigten sich mit dem Laserverbund gegossener Legierungen, die in Form von Platinen miteinander vereinigt wurden. Obwohl zum Beispiel die Ergebnisse von BEHRENS (1990) den hier erzielten Zugfestigkeiten sehr ähnlich sind, können sie nicht direkt miteinander verglichen werden. Die Prüfkörper beider Untersuchungen weisen im Ausgangszustand ein unterschiedliches Gefüge auf. Während der Edelstahldraht eine Ziehtextur besitzt, liegt bei der Legierung Remanium® CS wie bei allen Gusslegierungen ein reines Gussgefüge vor. Letzteres wird durch die Einwirkung der Laserenergie in der Regel zwar feinkörniger und homogener, die ursprüngliche Grundstruktur bleibt jedoch weitgehend erhalten. Im Gegensatz dazu erhält der Remanium®-Draht durch den Prozess des Drahtziehens und den daraus resultierenden Verschiebungen der Kristallebenen eine sogenannte Ziehtextur. Durch das Aufschmelzen des Metalls beim Laserschweißen geht diese Kristallverschiebung verloren. Es entsteht ein Gefüge, das der einer Gusslegierung ähnelt. Bei dem Edelstahldraht ist also die Gefügeänderung zwangsläufig in der Schweißzone ausgeprägter als bei den von BEHRENS (1990) oder anderen untersuchten gegossenen Legierungen. Vergleicht man abschließend die Zugfestigkeiten der gelaserten Drähte mit den Anforderungen der internationalen Norm ISO 9333 an

gelötete Verbindungen (GUNDLACH und KUSCHER, 1996 b), liegen die Zugfestigkeiten aller in dieser Arbeit untersuchten Probekörper deutlich über dem geforderten Wert von 350 N/mm².

5.2.1 Der Einfluss der Laserparameter

Nach Begutachtung der entstandenen Verbindungen mit dem bloßen Auge konnten insgesamt 69 der möglichen 100 verschiedenen Schweißverbindungen des Drahtes 1,0 mm in die Zugfestigkeitsuntersuchungen einbezogen werden. Sie wiesen also makroskopisch keine oder scheinbar zu tolerierende Materialschäden auf. Dennoch konnten nur 17 der ausgewählten 69 Verbindungen eine prozentuale Zugfestigkeit von mindestens 85 % erzielen. Mit sechs Parameterkombinationen war die Herstellung einer Verbindung nicht möglich.

Betrachtet man die Ergebnisse der Zugfestigkeitsprüfung im Überblick, wie in Tabelle 4 auf Seite 42 dargestellt, so fällt folgendes auf: Verbindungen mit einer Festigkeit größer oder gleich 85 % des Ausgangsdrahtes wurden hauptsächlich mit Impulslängen von 1,0 ms und 2,5 ms erzielt. Lediglich bei großem Fokus (1,0 mm) und mittlerer Spannung (205 V) ist bei einer Impulslänge von 5,0 ms eine vergleichbare Festigkeit erzielt worden.

Beschränkt man die Untersuchung allein auf das makroskopische Bild der Schweißnaht, sind auch Impulslängen bis zu 10 ms denkbar, wenn Fokus und Spannung aufeinander abgestimmt sind. Bezieht man allerdings die Zugfestigkeit und die Oberfläche des angrenzenden, nicht aufgeschmolzenen Materials als Qualitätskriterien ein, sollte auf den Einsatz von Impulsen länger als 5,0 ms bei dieser Drahtstärke verzichtet werden.

Die Mehrzahl der Verbindungen mit einer Festigkeit über 85 % wurde mit einer Impulslänge von 2,5 ms erreicht. Dabei konnten sowohl die Spannung als auch der Fokus in den vorgegebenen Grenzen variiert werden. So ist zum Beispiel mit einer Spannung von 230 V der Fokus zwischen 0,4 mm und 1,0 mm variabel wählbar, ohne eine nachhaltige Änderung der Zugfestigkeit feststellen zu müssen. Lediglich bei kleinstem Fokus von 0,2 mm konnte nur mit einer Spannung von 180 V die Festigkeitsgrenze von 85 % erzielt werden. Demzufolge lässt sich bei einer Impulslänge von 2,5 ms der Fokus zwischen 0,2 mm und 1,0 mm frei wählen, wenn man den Einsatz der Spannung beachtet, also bei kleinem Fokus geringe Spannungswerte nutzt und bei großem Fokus zu höheren Spannungen hin tendiert. Bei mittlerem Fokus

(0,4 - 0,8 mm) ist die Wahl der Spannung im Rahmen von 205 V - 230 V nahezu ohne Einfluss auf das Erreichen der Grenzfestigkeit.

Die Ergebnisse von Drähten mit reduziertem Durchmesser zeigen, dass mit den konstant gehaltenen Werten für die Impulslänge (2,5 ms) und den Laserstrahldurchmesser (0,6 mm) Festigkeiten über 85 % erzielt werden konnten. Allerdings war die richtige Wahl der Spannung entscheidend. Wie die Abbildung 28 auf Seite 51 zeigt, erfordert ein kleinerer Drahtquerschnitt geringere Spannungen als jener mit 1,0 mm Durchmesser. Es ist nicht auszuschließen, dass sich bei dem Draht mit einem Durchmesser von 0,7 mm durch eine weitere Reduzierung der Spannung unter 170 V noch höhere Zugfestigkeiten erzielen lassen.

Betrachtet man die Variationsfähigkeit der Parameter, sind Spannung und Fokus in größeren Bereichen variabel einsetzbar, während die Impulslänge für eine stabile Verbindung festgelegt ist. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Impulslänge die Höhe der Zugfestigkeit statistisch signifikant beeinflusst. Der bereits als günstig deklarierte Wert von 2,5 ms stimmt mit der von FREYTAG (1993) in seiner Untersuchung an der Kobalt-Chrom-Basislegierung Wisil LA[®] genutzten Impulslänge überein. Auch DORN et al. (1992) empfehlen für das Schweißen von Drähten aus gleichen Metallen kurze Pulszeiten. So können Grobkornbildungen vermieden und hohe Zugfestigkeiten erzielt werden.

Dennoch widersprechen die dargestellten Ergebnisse einigen bisher getroffenen Aussagen anderer Autoren. Obwohl LAATZ (1997) ebenso mit Remanium[®]- Drähten arbeitete, sind seine Ergebnisse nicht direkt mit den hier vorliegenden zu vergleichen, da sowohl unterschiedliche Laseranlagen als auch unterschiedliche Stoßformen verwendet wurden. Bei den im Kreuzstoß verschweißten Drähten erzielte er mit der Impulslänge 12,8 ms bessere Zugfestigkeiten als mit der deutlich geringeren Impulslänge von 3,2 ms. Die Konstellation der Fügestelle und die alleinige Erwärmung des oberen Drahtes verlangen ein größeres Schmelzvolumen für eine Verbindung als die gleichzeitige Erwärmung beider Drähte direkt an der Berührungsstelle. Um dieses größere Materialvolumen auf die Schmelztemperatur zu erhitzen, muss der Laserstrahl länger einwirken. Auch VAN BENTHEM (1992) fasste für die Wahl der Laserparameter unter anderem zusammen, dass die Schweißung mit der größtmöglichen Impulslänge durchzuführen (>10 ms) ist. Er bemerkte allerdings auch, dass die Kenntnis der Legierungszusammensetzung und die Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse der Fügestelle eine unabdingbare Voraussetzung zur Wahl der optimalen Parameter darstellt. Anzumerken bleibt weiterhin, dass er seine Erkenntnisse aus dem Schweißen von Gusslegierungen in Form von Platinen gezogen hat. BEHRENS (1990) erzielte für die Kobalt-Chrom-Legierung Remanium[®] 2000 und die Nickel-Chrom-

Legierung Remanium® CS eine Erhöhung der Zugfestigkeit mit längeren Laserimpulsen (12 ms) und größerer Spannung (330 V).

Der von VAHL und VAN BENTHEM (1980, 1992) sowie von FISCHER (1990) propagierte Einfluss der Impulsfolgefrequenz ist in der praktischen Anwendung des Zahntechnikers bei der geringen Größe der zu fügenden Teile von untergeordneter Bedeutung. Für eine gute Schweißung der dünnen Drähte ist die exakte manuelle Positionierung der Fügestelle in den Fokus des Laserstrahls entscheidend.

Bezüglich der Laserstrahlgröße und der Spannung sind nicht in jedem Fall direkte Vergleiche mit den bereits erschienenen Publikationen möglich, da in den Untersuchungen eine Reihe unterschiedlicher Laseranlagen zum Einsatz kam, die in ihrem Aufbau und den einzustellenden Parametern sehr differieren. So erfolgt die Angabe der Laserstrahlgröße in einzelnen Veröffentlichungen in Skalenteilen, die keinen eindeutigen Rückschluss auf den Durchmesser des Laserstrahles zulassen. Dennoch sei auch hier noch einmal der Vergleich mit der Arbeit von VAN BENTHEM und LAATZ (1997) erlaubt. Aufgrund des gekreuzten Überlappstoßes wird bei dieser Schweißnahtkonfiguration ein Laserstrahldurchmesser benötigt, der mindestens das 1,2 -1,5-fache des Drahtdurchmessers betragen sollte. Nur so sei eine ausreichende Aufschmelzung beider Drähte möglich. Im Gegensatz dazu erwiesen sich bei der hier gewählten Konstellation der Fügestelle die Laserstrahlen mit einem kleineren Durchmesser als die zu verschweißenden Drähte als günstiger. Das Gefüge der Drähte wird in geringerem Umfang verändert, als es bei einer großflächigen Aufschmelzung der Fall ist. Die entsprechend hohen Zugfestigkeiten bestätigen diese Aussage.

Über den Einfluss der Spannung ist lediglich eine Tendenz als Aussage zu diesem Laserparameter möglich, da vielfach die Impulsenergie als Einflusskriterium aufgeführt wird. So warnten VAHL et al. (1984) vor zu hohen Pulsenenergien. Sie könnten im Werkstück zu Lunkern und Porositäten führen, wodurch die Zugfestigkeit reduziert würde. Im Gegensatz dazu bemerkte BEHRENS (1990) mit einer Erhöhung der Spannung einen Festigkeitsgewinn. PRESCHER (2002) und OSBURG (2002) nutzten für die Remanium®-Drähte mit den Durchmessern 0,7 mm und 0,8 mm einen konstanten Spannungswert (220 V). Dieser Wert liegt innerhalb des Bereiches, der in der vorliegenden Arbeit eingegrenzt worden ist. Allerdings wurden in dieser Untersuchung mit den niedrigeren Spannungen (0,7 mm: 170 V, 0,8mm: 180 V) höhere Zugfestigkeiten erzielt als mit 230 V. Diese Spannungsangaben sind direkt zu vergleichen, da in allen drei Arbeiten das gleiche Lasergerät genutzt wurde. Allerdings unterscheiden sich die Stoßformen.

Der Ausschluss einiger Verbindungen aus den weiteren Untersuchungen ist neben der Materialschädigung auch auf eine fehlende Aufschmelzung der Drähte zurückzuführen. Dies trat bei großen Laserstrahldurchmessern in Kombination mit geringen Spannungswerten und kurzen Laserimpulsen auf. In diesen Fällen ist zu vermuten, dass die Impulsenergie und die Leistungsflußdichte des Laserstrahles nicht ausreichten, um das Metall im Schweißpunkt auf die Schmelztemperatur zu erwärmen. Im Bereich der Wirkung der Strahlen war an beiden Drähten eine kreisrunde, lokale Schmelzreaktion zu verzeichnen, das Fließen des Metalls in die Fügezone blieb jedoch aus. Ein gegenteiliger Effekt trat bei zu kleinen Laserstrahldurchmessern in Kombination mit großen Spannungswerten und Impulslängen auf. Hierbei wurde das Material im Schweißnahtbereich lokal so stark erhitzt, dass ein zum Teil explosionsartiger Materialabtrag mit Defekten in der Schweißnaht ähnlich einer Bohrung und anschließendem Kondensatniederschlag zu verzeichnen war. Die Ursache für diese Erscheinung ist ein zu hoher Energieeintrag auf einer zu kleinen Fläche. Aufgrund der geringen Probendimensionierung und der geringen Wärmeleitfähigkeit kommt es lokal zu einem Wärmestau, der zu einer Erhitzung des Metalls bis zur Verdampfungstemperatur führt. VAN BENTHEM et al. untersuchten diesen Effekt schon 1978 und stellten eine Proportionalität zwischen den Impulsenergien und den Massenverlustbeträgen fest.

Warum aber erreichten Proben mit einer optisch als gut klassifizierten Oberfläche oder mit geringen Materialschädigungen nur Festigkeiten unter 85 %? Ausschlaggebend könnten zwei unterschiedliche Prozesse sein. Zum einen kann durch einen hohen Energiebetrag der Laserstrahlung die einwirkende Wärme neben dem Aufschmelzen des Metalls auch zu einer umfangreicherem Rekristallisation des Gefüges in den Randzonen der Schweißnaht geführt haben. Diese Überhitzung bewirkt eine Umordnung der Kristalle in ihre ursprüngliche Lage bzw. entsprechend des Temperaturgradienten. Infolgedessen nimmt die Festigkeit ab. Dieser Effekt ist wahrscheinlich bei denjenigen Verbindungen abgelaufen, die zwar eine blanke Schweißnaht, daneben aber leicht verfärbte Areale aufweisen. Nach FINKE (1998) kann die Bildung der Anlauffarben als Zeichen der Oxidation nicht vollständig verhindert werden, da adsorbierteter Restsauerstoff immer an der Werkstückoberfläche vorhanden ist. Je nach Dicke dieser Oxidationsschicht, die von der einwirkenden Temperatur abhängig ist, lassen sich Farben von gelb über rot bis blau erkennen. Je dunkler also die entstandene Anlauffarbe ist, umso höher war die dort einwirkende Temperatur und umso stärker die daraus resultierende Gefügeveränderung. Somit kann das Ausmaß der Materialbeeinflussung außerhalb der Schweißnaht an Hand der Anlauffarbe abgeschätzt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass die

auf treffende Energie zu gering war, um eine vollständige Verbindung beider Drähte zu bewirken. In diesen Fällen könnte sich zwar an der Oberfläche eine innige Verbindung der Drähte gebildet haben, dennoch kann in der Tiefe das Aufschmelzen beider Verbundpartner ausgeblieben sein. Es handelt sich dann um eine zu geringe Schweißnahttiefe. Diese Erklärung trifft vermutlich für Verbindungen zu, die innerhalb der Schweißnaht gebrochen sind. Bestätigt wird diese Vermutung durch die Untersuchung eines solchen Gefüges. In der Abbildung 32 (Seite 55) konnte gezeigt werden, dass im Zentrum der Fügestelle die Drähte nicht aufgeschmolzen sind.

Des Weiteren ist belegt worden, dass zwischen der Oberflächenqualität der Schweißnaht und der Lokalisation der Bruchstelle ein Zusammenhang besteht. Verbindungen mit einer unregelmäßigen Schweißnaht sind vorrangig innerhalb der Schweißnaht gerissen, während die verfärbten Verbindungen im angrenzenden Draht versagt haben. Es ist zu vermuten, dass bei zu hoher Laserspannung der angrenzende Werkstoff überhitzt wird und sich dadurch seine Festigkeit reduziert. In weitaus stärkerem Maße ist diese Erscheinung in der Wärmeeinflusszone der Abbildung 34 (Seite 57) zu erkennen.

5.2.2 Gefügeuntersuchungen

Alle Gefügebilder wiesen charakteristische Merkmale auf. Es zeigten sich Schmelzonen, die durch sogenannte Schmelzlinien von der angrenzenden Übergangszone begrenzt wurden. Die Größe und Ausprägung dieser Gefügemerkmale variierte in Abhängigkeit von den eingesetzten Laserparametern.

Nach VAN BENTHEM (1992) kommt der Erstarrungsprozess des gepulsten Laserschweißens einem Abschreckungseffekt gleich, was die deutliche Abgrenzung der Schweißpunkte durch die Schmelzlinien erklären könnte. In der Schweißnaht sind die Kristallite zur Oberfläche oder zur Schweißnahtmitte orientiert. Nach DILTHEY (1995) erfolgt die Erstarrung des Schweißgutes entsprechend dem Temperaturgradienten. Sie beginnt an der Grenze zum festen Grundwerkstoff und verläuft gerichtet zur Schweißnahtmitte. Es bilden sich Stengelkristallite. Durch die Überlappung eines nachfolgenden Schweißpunktes entsteht ein feinkörniges Gefüge. Dieser Prozess ist mit dem Mehrlagenschweißen zu vergleichen, bei dem nach ANIK (1995) die Stengelkristalle durch die erneute Wärmeeinwirkung rekristallisieren. Diese Erscheinung konnte an den angefertigten Querschliffen sowohl bei der Überlappung zweier aufeinanderfolgender Schweißpunkte als auch bei der Berührung oder Überlagerung zweier sich gegenüberliegender Schweißkegel beobachtet werden.

Zwischen dem Primärgefüge der Schweißnaht und dem Ausgangsgefüge des Drahtes besteht eine Übergangszone, die nicht durch direkte Lasereinstrahlung, sondern durch Wärmeleitung von der Schweißnaht aus entstanden ist. Diese Wärmeeinflusszone ist in allen untersuchten Querschliffen dieser Arbeit zu erkennen. Auch SCHLIEMANN (1989) fand bei der WIG-Schweißung von Gisadent KCM 83 und V₂A-Stahl mittels Chrom-Kobalt-Löt- und Schweißstäbchen eine Wärmeeinflusszone. Er beobachtete eine Gefügeauflockerung an den Korngrenzen des V₂A-Stahles. Aus dem metastabilen Austenit hatte sich eine ferritische Struktur mit Chromkarbiden gebildet. Im Gegensatz dazu konnte VAN BENTHEM (1992) beim Laserpulsschweißen von Nichtedelmetallen keine Wärmeeinflusszone nachweisen.

Die unterschiedlich starke Färbung der beiden Bereiche der Wärmeeinflusszone könnte auf die stattgefundenen Gefügeveränderungen zurückzuführen sein. WEGENER (2002) fand bei seinen Untersuchungen an verschiedenen Edelmetalllegierungen eine wärmebeeinflusste Zone, in der weniger Lunker zu beobachten waren als im unbeeinflussten Gussgefüge.

Nach BECKERT und KLEMM (1984) beeinflusst der Behandlungszustand des Stahles seine Anätzbarkeit. Danach lässt sich ein Chrom-Nickel-Stahl im rekristallisierten Zustand besser anätzen als im Guss- oder im kaltverformten Zustand. Im dunkel gefärbten Bereich der Wärmeeinflusszone hat demzufolge eine Rekristallisation stattgefunden. Bekräftigt wird diese Vermutung durch die Tatsache, dass in der Abbildung 34 (Seite 57) in dieser Zone quer zur Schweißnaht orientierte Kristalle nachgewiesen worden sind. Ursprünglich waren diese Kristallite in der Ziehrichtung des Drahtes ausgerichtet und konnten in den Schliffbildern nur in ihrem Querschnitt dargestellt werden. Der hellere Bereich der Wärmeeinflusszone ist anhand der gezeigten Bilder nicht eindeutig zu interpretieren. Ob es hier ähnlich den Veränderungen an un- bzw. niedriglegierten Stählen zur Bildung einer Grobkorn bzw. Überhitzungszone mit angrenzender Feinkorn- bzw. Normalisierungszone kam, ist nicht sicher.

Zu klären bleibt weiterhin, wodurch die dunklen, Flecken ähnlichen „Verunreinigungen“ der Gefüge entstehen. Nach BECKERT und KLEMM (1984) kann es durch Veränderung der Ätzmittelzusammensetzung zu einem örtlich verstärkten Ätzangriff kommen. In der hier verwendeten Variation des Ätzmittels könnte demzufolge der erhöhte Salpetersäureanteil für diese Erscheinung verantwortlich sein.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass das Gefüge der Remanium®-Drähte sowohl im Bereich der Schweißnaht selbst als auch im angrenzenden Ausgangsdraht verändert wird. Das Ausmaß dieser Veränderungen wird maßgeblich durch die Größe der eingesetzten Laserparameter bestimmt.

5.3 Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit traten Fragen auf, die in weiteren Untersuchungen geklärt werden sollten.

Es wäre zum Beispiel zu erörtern, welchen Einfluss die Gestaltung der Schweißnahtenden auf die Festigkeit der Verbindung hat, da man bei der hier gewählten Form eine Kerbwirkung in diesem Bereich nicht ausschließen kann. Diese ergibt sich aus der leicht konkaven Form des letzten Schweißpunktes. Ursache dafür ist der mangelnde Schmelzmaterialfluss, da das Gleichgewicht des Aufschmelzens beider Drähte zu dem weiterführenden Draht hin verschoben ist. Der Übergang der doppelt gelagerten und verschweißten Drähte zu den einfachen Drahtabschnitten könnte eine Stelle verminderter Festigkeit sein, an denen die Lastspannung die Gesamtspannung übersteigt.

Es sollte auch untersucht werden, ob die Nachbearbeitung dieser Übergangszonen mittels Laserstrahl im Sinne eines glättenden Überschweißens oder mit rotierenden Instrumenten in Form von Korundsteinen und Gummipolierern erfolgen kann.

Des Weiteren werden gerade in der Crozat-Technik unterschiedliche Drahtstärken miteinander verbunden. Auch für diese Konfiguration ist eine exakte Parameterwahl zu treffen und zu erproben.

6 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Bestimmung optimaler Laserparameter für die Herstellung von geschweißten Drahtverbindungen, die im Parallelstoß gefügt werden. Dabei sollte gleichzeitig untersucht werden, ob und in welchem Maße die varierten Laserparameter Impulslänge, Spannung und Fokus die Höhe der Zugfestigkeit beeinflussen. Des Weiteren war zu prüfen, ob bei dem verwendeten Edelstahl eine Wärmeeinflusszone nachzuweisen ist und ob deren Ausdehnung von der Größe der genannten Laserparameter abhängt.

Für diese Untersuchung wurde der Edelstahldraht Remanium® (Firma Dentaurum, Ispringen, D) mit einem Durchmesser von 1,0 mm genutzt. In geringerem Umfang sind artgleiche Drähte des Durchmessers 0,7 mm und 0,8 mm einbezogen worden. Die ca. 60 mm langen, gerichteten und begradigten Drähte wurden bei einer Überlappung von 5 mm mit dem Laserschweißgerät „Neolaser L126500“ der Firma Girrbach Dental GmbH (Pforzheim, D) beidseitig verschweißt. Der Laserstrahl war zentral auf die Berührungsflächen der beiden Drähte gerichtet. Die Laserparameter Impulslänge, Spannung und Fokus wurden in vorgegebenen Schritten variiert, so dass einhundert verschiedene Kombinationen entstanden. Die geschaffenen Verbindungen sind anhand ihrer Oberflächenqualität klassifiziert worden. Die Zugfestigkeitsprüfung erfolgte an der Universalprüfmaschine Z2020 (Firma Zwick, Ulm, D). Die gemessenen Werte wurden in prozentuale Werte der Ausgangsfestigkeit umgerechnet und verglichen. Beispielhaft erfolgte die mikroskopische Untersuchung des entstandenen Gefüges an einzelnen für die mikroskopische Charakterisierung präparierten Proben. Von den 100 möglichen Laserparameterkombinationen verursachten 25 makroskopisch sichtbare Materialschädigungen, 6 führten nicht zu einer Verbindung der Drähte. Diese 31 Prüfkörpergruppen wurden nicht in die Zugfestigkeitsprüfung einbezogen. Mit 31 Laserparameterkombinationen entstanden vollkommen blanke und fehlerfreie Verbindungen, 38 wiesen kleine Fehler auf (geringgradige Verfärbungen, unregelmäßige Schweißnähte). Die Zugfestigkeit der fehlerfreien Verbindungen war statistisch signifikant höher als die Zugfestigkeit der letztgenannten Gruppe. Mit 17 Laserparameterkombinationen konnten relative Zugfestigkeiten von mindestens 85 % erzielt werden. Von diesen führten 14 Laserparameterkombinationen zu fehlerfreien Schweißverbindungen, drei wiesen eine unregelmäßige Schweißnaht auf.

Die Impulslänge hat statistisch signifikant sowohl Einfluss auf die Qualität der Schweißnahtoberfläche als auch auf die Höhe der Zugfestigkeit. Die Laserparameter Spannung und Fokus konnten ohne nachhaltige Änderung der Festigkeit in bestimmten Grenzen variiert werden. Bei einer Impulslänge von 2,5 ms war es möglich,

Spannungswerte zwischen 205 V und 230 V einzusetzen und den Fokus zwischen 0,4 mm und 0,8 mm zu variieren.

Bei geeigneter Wahl der Laserparameter konnte eine durchgängige Schweißnaht geschaffen werden, die aus den sich berührenden oder überlappenden Schweißkegeln von Lage und Gegenlage bestand. Eine Wärmeeinflusszone war in allen untersuchten Proben nachzuweisen. Die Ausdehnung dieser Übergangszone wird durch die Wahl der Laserparameter beeinflusst. Die Vermessung der Wärmeeinflusszone im Bereich der größten Ausdehnung der Schweißkegel und der Rückschluß auf den Einfluss der Laserparameter war mit der hier angewandten Methode nicht möglich.

Mit der in dieser Arbeit untersuchten Stoßform lasergeschweißter Drähte lassen sich demzufolge sowohl bei der Neuanfertigung als auch bei der Reparatur von kieferorthopädischen Apparaturen stabile Verbindungen erzeugen, die den Forderungen nach möglichst gleichartigen Metallen und damit hoher Biokompatibilität entsprechen. Es ist zu vermuten, dass die Korrosionsfestigkeit dieser lasergeschweißten Verbindungen deutlich höher ist als die gelöteter Verbindungen. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass die für Lötungen geforderte Zugfestigkeit von 350 N/mm² sicher erfüllbar ist. Es ist zu empfehlen, die Schweißnaht auch bei Anwendung optimaler Laserparameter mit dem bloßen Auge hinsichtlich der Oberflächenqualität zu überprüfen, wobei sowohl die Ausformung der Schmelzpunkte bzw. deren Aneinanderreihung als auch die direkte Umgebung der Fügestelle als Beurteilungskriterien herangezogen werden muß. Es sollten nur solche Verbindungen zum Einsatz kommen, deren Schweißnähte eine gleichmäßig strukturierte und blanke Oberfläche besitzen und deren direkt daran angrenzende Materialbereiche keine Anlauffarben aufweisen.

7 Literaturverzeichnis

1. Anik, Selâhaddin: Schweißeignung metallischer Werkstoffe. Dt. Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 1995, S.11 und S.150-152
2. Beckert M, Klemm H: Handbuch der metallographischen Ätzverfahren. 4.Aufl. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1984, S.126-129
3. Behrens K: Laserverbund von Nichtedelmetallen und Titan unter besonderer Berücksichtigung der Laserparameter. Diss. Freie Univ. Berlin, 1990
4. Benthem H van: Laseranwendung in der Zahnärztlichen Prothetik und der dentalen Technologie. In: Vahl J, van Benthem H (Hrsg.): Laser in der Zahnmedizin. Quintessenz-Verl.-GmbH, Berlin, Chicago, London, 1992, S.141-172
5. Benthem H van: Laseranwendung zur Materialbearbeitung. Dtsch Zahnärztl Z 49 (1994) 119-123
6. Benthem H van, Laatz M: Lassen sich kieferorthopädische Drähte unter Praxisbedingungen mit dem gepulsten Nd:YAG-Laser schweißen? In: Waidelich W (Hrsg): Laser 97. Springer Verlag, Berlin 1997, S. 456-460
7. Benthem H van, Vahl J: Untersuchungen zur Zerreißfestigkeit lasergeschweißter Dentallegierungen. Dtsch Zahnärztl Z 33 (1978) 262-266
8. Benthem H van, Vahl J: Vorteile des Laserschweißens von Dentallegierungen - Ein neuer Weg in der dentalen Technologie. Dtsch Zahnärztl Z 33 (1978) 486-488
9. Benthem H van, Vahl J: Laserexperimente an dentalen Edelmetallen 1.Mitteilung: Gefügeuntersuchungen. Dtsch Zahnärztl Z 34 (1979) 655
10. Benthem H van, Vahl J: Einsatzmöglichkeiten verschiedener Lasertypen in der Dentalen Technologie. Dtsch Zahnärztl Z 35 (1980) 947
11. Benthem H van, Predel B, Vahl J: Zum Verdampfungsverhalten von Metallen bei Laserbestrahlung. Z Metallkunde 69 (1978) 121-125
12. Beyer E: Schweißen mit Laser: Grundlagen. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1995, S. 1-16
13. Brunner W, Junge K: Wissensspeicher Lasertechnik. 3. Aufl. Fachbuchverlag, Leipzig, 989, S. 301
14. Combe EC: Zahnärztliche Werkstoff–Zusammensetzung–Verarbeitung–Anwendung. Carl-Hanser-Verlag, München, Wien, 1985, S.82
15. Dielert E, Kasenbacher A: Lötungen, Mikroplasma- und Laserschweißungen an Dentallegierungen. Dtsch Zahnärztl Z 42 (1987) 647-653
16. Dielert E: Werkstoffprüfungen an mikroplasmageschweißten und gelöteten Dentalgoldlegierungen – ein Vergleich der beiden thermischen Verbindungsverfahren. Dtsch Zahnärztl Z 34 (1979) 23-26

17. Dielert E: Zum Einsatz des gebündelten Lichtbogens beim Verbindungsschweißen von Gold- und Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 33 (1978) 677-681
18. Dilthey U: Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Bd.1. Schweiß- und Schneidtechnologien. 2.Aufl., VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994, S.168 – 178
19. Dilthey U: Schweißtechnische Fertigungsverfahren. Bd. 2. Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 51-59, S. 150., S.181-185, S.192-195
20. Dobberstein H: Laserbearbeitung von Dentallegierungen mit einem Festkörperlaser – ein Beitrag zu den Grundlagen der Laseranwendung in der Zahnmedizin, Diss. B Humboldt-Univ. Berlin, 1990
21. Dorn L, Grutzeck H, Jafari S: Schweißen und Löten mit Festkörperlasern. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (usw.), 1992
22. Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau. In: Beitz W, Küttner KH (Hrsg): Taschenbuch für den Maschinenbau. 17.Aufl., Berlin (u.a.), Springer, 1990, S. E 36
23. Eichler H J, Eichler J. Laser High-Tech mit Licht. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1995, S. 47-62
24. Erhardt K-M, Heine A, Prommersberger H: Laser in der Materialbearbeitung, Vogel, Würzburg, 1993, S. 26-63
25. Eske J: Vergleichende Untersuchungen über die Veränderung der Paßgenauigkeit zahnärztlicher Gußarbeiten, die nach herkömmlicher Lötmethode bzw. mit dem Laserstrahl verbunden wurden, Diss. Univ. Marburg, 1975
26. Finke, KM: Einfluß thermisch erzeugter Deckschichten auf die Korrosionsbeständigkeit geschweißter Cr-Ni-Stähle. Diss. Techn. Univ. Braunschweig, 1998
27. Fischer P: Laserschweißen der Nichtedelmetalllegierung Gisadent KCM 83 – Eine Grundlagenanalyse. Diss. Humboldt-Univ. Berlin, 1990
28. Frentzen M, Koort HJ: Lasertechnik in der Zahnheilkunde. *Dtsch Zahnärztl Z* 46 (1991) 443-454
29. Freytag U: Untersuchungen zum Einfluß der Laserschweißbedingungen auf das Schweißergebnis. Diss. Univ. Berlin, 1993
30. Geis-Gerstorfer J, Weber H, Simonis A, Eckhardt M, Haselberger D: Zugfestigkeit von plasma- und lasergeschweißtem gegossenem Titan. *Dtsch Zahnärztl Z* 45 (1990) 545-547
31. Gilde H: Physik und Strahlenschutz der Lasertechnik. In: Vahl J, van Benthem H (Hrsg.): *Laser in der Zahnmedizin*. Quintessenz-Verl.-GmbH, Berlin, Chicago, London (usw.) 1992, S. 13-41

32. Gilde H: Grundlagen der Lasertechnologie. Dtsch Zahnärztl Z 49 (1994) 95-99
33. Glöckner H-W: Implantatgetragene Suprastrukturen aus präfabrizierten Titankomponenten. Quintessenz Zahntech 23 (1997) 875-884
34. Gundlach HW, Kuscher G: Das Laserschweißen in der zahntechnischen Praxis. dental-labor 44 (1996) 677-685
35. Gundlach HW, Kuscher G: Das Laserschweißen in der zahntechnischen Praxis II. dental-labor 44 (1996) 1617-1626
36. Hemme J: Laserschweißungen (Stumpfstoß) von dentalen Nichtedelmetall – Legierungen zur Optimierung der Schweißqualität unter Variation ausgewählter Laserparameter. Med. Diss. Münster, 1989
37. Hoffmann A: Lasern – eine neue Technologie in der Zahntechnik. Quintessenz Zahntech 22 (1996) 659-677
38. Hofmann J: Die dentale Laserschweißtechnik Ein Erfahrungsbericht Teil 1: Qualität, Aufwand und Risiko der innovativen Verbundtechnik. dental-labor 40 (1992) 1221-1224,
39. Hofmann J: Die dentale Laserschweißtechnik Ein Erfahrungsbericht Teil 2: Der Indikationsbereich der innovativen Verbundtechnik. dental-labor 40 (1992) 1321-1328
40. Hofmann J, Lindigkeit J: Festigkeit von lasergeschweißten Drähten für kieferorthopädische Apparaturen. Quintessenz Zahntech 25 (1999) 437-443
41. Hofmann J, Lindigkeit J: Laserschweißen kombinierter Arbeiten. dental-labor (1999) 1285-1288
42. Hubertz P: Alternative Methoden der Verbindungstechniken. Quintessenz Zahntech 17 (1991) 1152-1164
43. Kappert HF: Schweißtechnik mit Plasma und Laser. Quintessenz Zahntech 17 (1991) 977-998
44. Kasenbacher A: Ermittlungen von Eigenspannungen an der laserstrahlgeschweißten CoCr-Legierung Vitalium, Diss. Univ. München, 1997
45. Kempka RP: Laserexperimente mit Hilfe eines cw Nd:YAG-Lasers an dentalen Edel- und Nichtedelmetall- Legierungen, Med. Diss. Münster, 1985
46. Kneubühl FK, Sigrist MW: Laser. 2.Aufl., Teubner, Stuttgart, 1989, S. 37
47. Körber K, Ludwig K: Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie. Thieme, Stuttgart, 1982, S. 310
48. Laatz M: Schweißen spezieller kieferorthopädischer Drähte unter Berücksichtigung des Laserschweißens. Med. Diss. Münster, 1997
49. Lenz P: Der Einsatz von Laserstrahlen in der Zahnheilkunde. ZM 3/1974 115-117

50. Löblein J-M: Mechanische Eigenschaften verschiedener Lötverfahren im Vergleich zur Laserschweißung kieferorthopädischer Drähte. Med. Diss. Univ. Würzburg, 2002
<http://opus.bibliothek.uni-wuerzburg.de/opus/volltexte/2003/631>
51. Marxkors R, Meiners H: Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde. 7. Aufl., Hanser, München, Wien, 1993, S. 139f.
52. Meyer ST: Mikromorphologische Untersuchungen an lasergeschweißten Fügeverbindungen zwischen hochgoldhaltigen- und Kobalt-Basislegierungen Diss. Univ. Tübingen, 1999
53. Mohr W: Vergleichende Korrosionschemische und Mikrohärteuntersuchungen an gelöteten und lasergeschweißten Nichtedelmetalllegierungen. Med. Diss. Univ. Leipzig, 1991
54. Öhlschläger E: Untersuchungen zum Laserpunktenschweißvorgang und zur Tragfähigkeit lasergeschweißter Metallverbindungen. Diss. Univ. Berlin, 1986
55. Osburg S: Werkstoffkundliche Untersuchungen lasergeschweißter kieferorthopädischer Drahtmaterialien im Vergleich zur Lötung unter besonderer Berücksichtigung der Korrosion. Med. Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg, 2002
56. Prescher J: Festigkeitsuntersuchungen an gebogenen, geschweißten und gelöteten kieferorthopädischen Drahtmaterialien unter besonderer Berücksichtigung der dynamischen Belastung. Med. Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg, 2002
57. Schatt W: Einführung in die Werkstoffwissenschaft. 7. Aufl., Dtsch. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1991, S. 346
58. Schell H: Laserschweißen (Stumpfstoß) von Dentallegierungen in unterschiedlichen Materialkombinationen. Med. Diss. Münster (Westfalen), 1984
59. Schliemann W: Vergleichende Untersuchungen zum Löten und Schweißen von Nichtedelmetalllegierungen. Zahntechnik 30 (1989) S. 73-79
60. Schmeil F, Hirschfelder U: Kieferorthopädische Zahntechnik. Ullstein Mosby, Berlin, Wiesbaden, 1997, S.108
61. Schwarz A: Korrosionsuntersuchungen an lasergeschweißten Dentallegierungen im Vergleich zur Lötung. Med. Diss. Humboldt-Univ. Berlin, 1992
62. Schwarzkopf F, Vogl E: Die Crozat-Technik: Kieferorthopädie - präprothetische Orthopädie. Verlag Neuer Merkur, München, 1980, S. 11
63. Sernetz F: Zur Bioverträglichkeit metallischer kieferorthopädischer Apparaturen. Quintessenz Zahntech. 22 (1996) 615-638

64. Sernetz F: Physikalische und technische Eigenschaften von Drähten für die Kieferorthopädie und Orthodontie – Teil 3 (Legierungen). Quintessenz Zahntech 25 (1999) 775-789
65. Trautmann T: Untersuchungen zum Verzug lasergeschweißter Probekörper bei Variation der Laserparameter Spannung und Pulsdauer und der Lage der Prüfkörper unterschiedlicher dentaler Legierungen. Med. Diss. Univ. Greifswald, 2001
66. Vahl J, Bethem H van: Lasertypen und deren Einsatz in der Zahntechnik. dental-labor 29 (1981) 563-570
67. Vahl J, Bethem H van, Juchler W: Laserexperimente an dentalen Edelmetallen 2. Mitteilung: Zerreißfestigkeit und Härte. Dtsch Zahnärztl Z 34 (1979) 656
68. Vahl J, Bethem H van, Schell H: Laserexperimente an Dentallegierungen und ihre Ausweitung auf spezielle zahntechnische Arbeiten (1. Mitteilung). Dtsch Zahnärztl Z 39, (1984) 778-781
69. Wegener O: Untersuchungen zum Einfluß des Laserschweißens auf die Haftfestigkeit von Metall-Keramik-Verbundsystemen. Med. Diss. Univ. Halle; 2002
70. Wolf G: Mikrostrukturelle und makroanalytische Untersuchungen zum Laserschweißen von Dentallegierungen und Titan. Med. Diss. Univ. Jena; 2000

8 Thesen

1. Obwohl das Laserschweißen seit geraumer Zeit in der Zahntechnik genutzt wird, sind noch nicht alle Möglichkeiten bezüglich des Einsatzes dieses Fügeverfahrens untersucht. Zurzeit steht die Anwendung des Laserschweißens bei der Verarbeitung von Gusslegierungen im Vordergrund.
2. Mit der Laserschweißtechnik besteht eine alternative Fügemethode zur Verbindung kieferorthopädisch genutzter Edelstahldrähte. Im Gegensatz zum Löten kann beim Laserschweißen auf ein Zusatzmaterial anderer Zusammensetzung verzichtet werden.
3. Der Edelstahldraht Remanium® zeichnet sich durch eine gute Schweißbarkeit aus. Voraussetzung für eine stabile Verbindung ist jedoch die Wahl einer geeigneten Stoßform und der entsprechenden Laserparameterkombinationen.
4. Durch die parallele Lagerung der Drähte wird der Querschnitt des Fügebereiches verdoppelt, wodurch sich die Festigkeit der Verbindungen erhöht.
5. Dabei existiert für die Herstellung der Schweißverbindung keine bestimmte Laserparameterkombination. Vielmehr ermöglicht eine Reihe unterschiedlicher Kombinationen der Laserbetriebsgrößen Spannung, Impulslänge und Fokus die Herstellung von Verbindungen hoher Festigkeit.
6. Den größten Einfluss auf die Höhe der Zugfestigkeit übt die Impulslänge aus. Sie muss daher sehr genau eingestellt werden. Die Laserparameter Spannung und Fokus sind in stärkerem Maße variabel zu wählen.
7. Unter der Voraussetzung optimaler Laserparameter und des Einsatzes von Schutzgas kann eine Oxidation auf der Materialoberfläche verhindert werden.
8. Eine optimale Schweißnaht zeichnet sich durch regelmäßige und blanke Schweißpunkte aus. Das Ausgangsmaterial in der Nachbarschaft ist nicht angelaufen.

9. Eine solche als makroskopisch „sehr gut“ zu bezeichnende Schweißnaht lässt eine höhere Zugfestigkeit erwarten als eine Verbindung mit unregelmäßiger Schweißnaht oder Anlauffarben auf der Drahtoberfläche.
10. Mit 14 Laserparameterkombinationen konnten Verbindungen hergestellt werden, deren Oberflächen fehlerfrei waren und die eine prozentuale Festigkeit von mindestens 85 % des Ausgangsmaterials aufwiesen.
11. Ungünstige Laserparameterkombinationen führen zu Oxidationsprozessen auf der Materialoberfläche bzw. zu Materialverbrennungen und –verdampfungen. Infolgedessen können unter Umständen auch unerwünschte Laserstrahlbohrungen auftreten.
12. In den mikroskopischen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass bei Edelstahldraht neben der eigentlichen Schweißnaht auch eine Wärmeeinflusszone entsteht. Die Form und Ausdehnung sowohl der Schweißnaht als auch der Wärmeeinflusszone ist von der Größe der eingesetzten Laserparameter abhängig.
13. Die Schweißkegel grenzen sich durch eine scharfe Linie eindeutig vom Grundwerkstoff ab. Sie weisen ein feinkristallines Gussgefüge mit Stengelkristallen auf. Durch die Überlappung oder Berührung der Schweißkegel von Lage und Gegenlage werden die ehemaligen Kontaktstellen beider Drähte vollständig aufgeschmolzen.
14. Bei der hier angewandten Vereinigung der beiden parallel gelagerten Drähte können die Schweißnahtenden im Zugversuch als Kerben wirken. Eine nachträgliche Bearbeitung ist aus diesem Grunde zu empfehlen. In weiteren Untersuchungen ist zu klären, ob dabei ein nachträgliches Überschweißen zum Glätten oder eine Bearbeitung mit rotierenden Instrumenten zum Einsatz kommen sollte.

LEBENSLAUF

Name: Uta Zimmermann

Geburtsdatum: 12.09.1974

Geburtsort: Leipzig

Familienstand: ledig

Schulbildung: Sept. 1981 - Aug. 1990 POS „Comenius“ Delitzsch
Abschluß: 9. Klasse

Sept. 1990 – Aug. 1991 „Erweiterte Ehrenberg-Oberschule Delitzsch, Vorbereitungsklasse zur Aufnahme in das Gymnasium

Sept. 1991 – Aug. 1993 Ehrenberg-Gymnasium Delitzsch, Abschluß mit dem Abitur

Hochschulausbildung: Okt. 1993 – Okt. 1998 Studium der Zahnmedizin an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Beruf: April 1999 - Dez. 2000 Assistenzzahnärztin in der Praxis Dr. J. Rinke, Gröbzig

Seit Jan. 2001 wissenschaftliche Mitarbeiterin der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit: „Untersuchungen zum Einfluss ausgewählter Laserparameter auf die Zugfestigkeit lasergeschweißter Chrom-Nickel-Drähte kieferorthopädischer Apparaturen“ selbstständig und unter ausschließlicher Nutzung der in der Arbeit aufgeführten Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die eingereichte Dissertation wurde von mir bisher keiner anderen Fakultät oder Universität vorgelegt.

Frühere Promotionsversuche sind nicht erfolgt.

Eine Aberkennung eines bereits erworbenen Doktorgrades liegt nicht vor.

Halle, den 29.09.2005

Unterschrift:

DANKSAGUNG

Herrn Prof. Dr. med. dent. habil. K.-E. Dette danke ich für die Überlassung des Themas, die Betreuung und freundliche Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit sowie die Durchsicht der Manuskripte.

Bei den Mitarbeitern des Instituts für Werkstoffwissenschaften möchte ich mich für die freundliche Zusammenarbeit bedanken.

Insbesondere Herrn Dr. Ing. J. Trempler danke ich für die Herstellung der Schliffpräparate, die geduldige Umsetzung neuer Wünsche sowie die Unterstützung und Hilfe bei der Auswertung der Präparate.

Frau Dr. Langner und Herrn Dr. Bierögel möchte ich für die Anregungen und Hilfeleistungen bei der Erstellung der Arbeit danken.

Frau Sachse gilt mein herzlicher Dank für die Durchführung der Zugversuche und die Dokumentation der Ergebnisse.

Den Zahntechnikern unserer Klinik möchte ich für die freundliche Bereitstellung der erforderlichen Materialien danken.

Herrn H. Benkwitz danke ich für die Entwicklung und Fertigung des Kreuztisches.

Frau Dr. Lautenschläger danke ich für die statistische Begutachtung meiner Arbeit.