

**Zusammenfassung**

Alle Verbindungstechniken, die im Dentallabor ihre Anwendung finden, müssen ausreichend stabil sein, um die auf sie wirkenden Kräfte schadlos zu überstehen, oder sie sollte nach Möglichkeit nicht in diesen Belastungszonen liegen. Wichtig ist, die auf diese Verbindungstechnik wirkenden Kräfte zu kennen und zu beherrschen. Der folgende Beitrag stellt die Verbindungsmethoden des Klebens, Silanisierens, Lötens, Schweißens, Laserschweißens und des Monoimpuls-Wolfram-Inertgas-Schweißens einander gegenüber und zeigt auf, was die einzelnen Fügeverfahren leisten können und was nicht.

**Indizes**

Fügeverfahren, Kleben, Silanisieren, Lötens, Schweißen, Laserschweißen, Monoimpuls-Wolfram-Inertgas-Schweißen

## Kleben, Lötens, Schweißen

**Andreas Hoffmann**

Es gibt drei Disziplinen, die ein Zahntechniker beherrschen sollte, wenn es um Verbindungstechniken im Labor geht: das Kleben, das Lötens und das Schweißen.

Allen Fügeverfahren, die in der Zahntechnik Anwendung finden, geht eine gemeinsame Anforderung voraus: Eine ausreichend stabile Verbindungstechnologie muss in der Lage sein, die auf sie wirkenden Kräfte schadlos zu überstehen, oder sie sollte nach Möglichkeit nicht in diesen Belastungszonen liegen. Das A und O in der Zahntechnik besteht darin, die auf diese Verbindungstechnik wirkenden Kräfte zu beherrschen. Ein Mix aus den verschiedensten Kräften, wie z. B. Schälbeanspruchung, Schärbeanspruchung, Torsionskräfte, Zugbeanspruchungen oder auch Druckbeanspruchungen wirken auf den Zahnersatz ein und werden in der Regel an solchen Verbindungsstellen in ihrer Art häufig umgewandelt. Genau in diesem Umwandlungsgebieten, wo Druck- in Zugkraft umgewandelt wird, werden häufig Verbindungstechnologien eingesetzt.

Im Allgemeinen werden Werkstücke aus Legierungen oder Metallen in der Zahntechnik durch verschiedene Verbindungsmethoden gefügt. Solche Methoden umfassen:

- das Kleben
- das Silanisieren

**Einleitung**



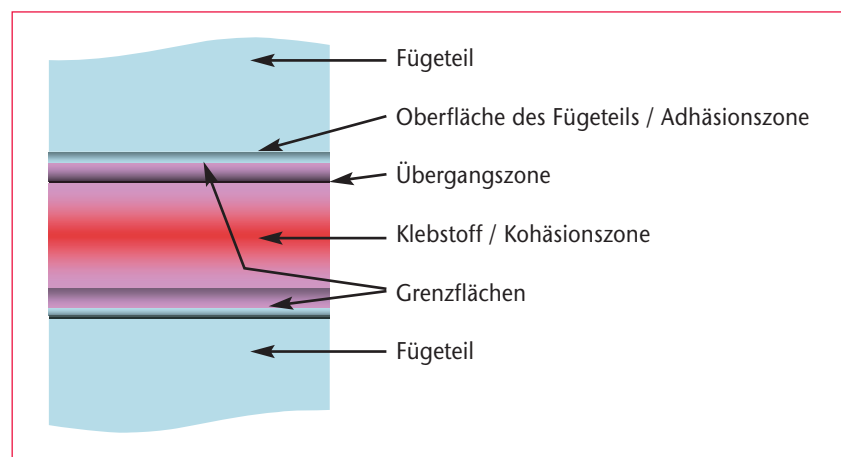
- das Löten
- das Schweißen
- das Laserschweißen (Nd: YAG-Lasergeräte)
- und das Monoimpuls-Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG)

**Das Kleben** Durch Kleben werden Füge­teile mit einem Klebstoff stoffschlüssig verbunden. Technisch betrachtet ist das Kleben ein Fügeverfahren, welches nahezu alle Werkstoffe miteinander und untereinander verbinden kann. Dabei ist die Klebtechnik besonders schonend, da sie keiner großen Hitze bedarf, welche Verzug, Abkühlspannungen oder Gefügeveränderung der Füge­teile zur Folge haben kann. Zum Kleben werden auch keine schwächenden Löcher in den Füge­teilen benötigt, wie etwa beim Schrauben oder Nieten. Außerdem wird beim Kleben die Kraft flächig vom einen zum anderen Füge­teil übertragen. Eine Klebeverbindung besteht aus den beiden Füge­teilen und der dazwischen liegenden Klebschicht. An den Phasengrenzflächen kommt es nach der Benetzung, die eine bedeutende Rolle spielt, zu Wechselwirkungen und zum mechanischen Formschluss. Zusammenge­nommen sind diese Effekte für die Haftkraft (Adhäsion) verantwortlich. Für eine optimale Benetzung muss der Klebstoff während des Fügevorgangs flüssig sein. Seine innere Festigkeit (Kohäsion) gewinnt er durch physikalische Abbindevorgänge oder durch chemische Reaktion. Diese zwei Faktoren (Adhäsion und Kohäsion) beeinflussen die Haltbarkeit einer Verklebung.

**Die Adhäsion (Grenzflächenhaftung)** Adhäsionskräfte wirken z. B., wenn ein nasses Blatt Papier an einer Glasscheibe hängen bleibt, sozusagen „klebt“. Eine hohe Adhäsion (Abb. 1) wird dann erreicht, wenn zwischen der Oberfläche des Werkteiles und dem Klebstoff ein enger Kontakt entsteht. Das ist nur möglich, wenn sich zwischen Klebstoff und Werkteil keine Fremdstoffe befinden. Das heißt, die Klebeflächen müssen sauber, fett- und staubfrei sein.

Die Adhäsion kann durch Anrauen der Materialoberfläche (Abstrahlen oder Ätzen) noch verbessert werden, weil dadurch das Werkstück von Fremdkörpern gesäubert und gleichzeitig eine Vergrößerung der Oberfläche erreicht wird.

Abb. 1 Der Querschnitt einer Klebung: die Adhäsionskräfte sind Anziehungskräfte mit geringer Reichweite ( $1\ \mu\text{m}$ ), die immer an Grenzflächen von festen Stoffe auftreten. Sie treten aber meist nicht sichtbar in Erscheinung (wenn man zwei Werkstücke aneinander hält, wirken keine spürbaren Kräfte), da die meisten Oberflächen so uneben sind, dass der Abstand der Moleküle, der zum Ausbilden dieser Kräfte nötig wäre, zu groß ist.



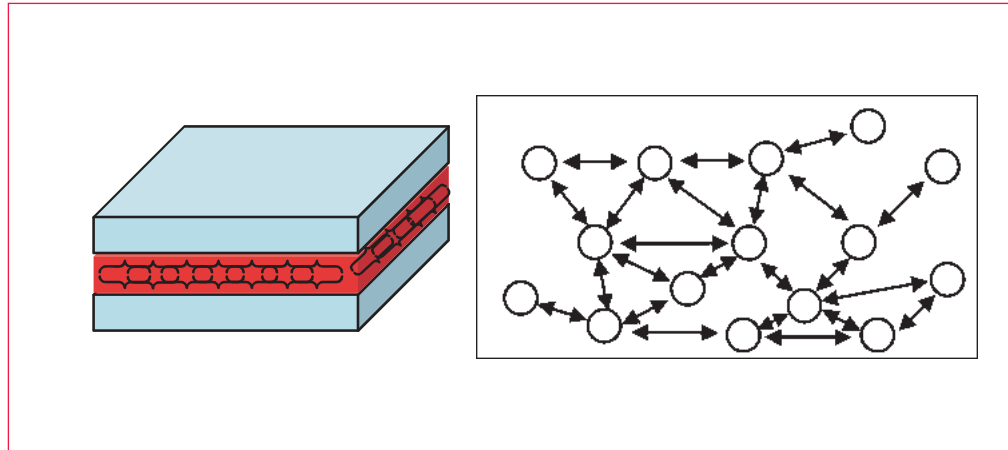


Abb. 2 Die Kohäsionskräfte sind zwischenmolekulare Kräfte, die innerhalb des Klebstoffs wirken und ihm die innere Festigkeit verleihen.

Die Kohäsion (Abb. 2) ist der Zusammenhalt der Klebstoffteile (Moleküle) untereinander. Je höher die Kohäsion ist, desto höher ist auch die Festigkeit des Klebstoffes. Beim Kleben selbst kann die Kohäsion optimal genutzt werden, wenn nicht unnötig dick aufgetragen wird.

Der Klebstoff haftet an der Fügeiteiloberfläche durch physikalische (selten auch chemische) Wechselwirkungen. Dieses Phänomen der Haftung wird auch, wie schon erwähnt, Adhäsion genannt. Anders als Schweißen oder Löten gehört die Klebtechnik zu den wärmearmen Fügeverfahren. Auch findet beim Kleben kein Diffusionsprozess zwischen Zusatzwerkstoff und Fügeiteil statt. Daher weisen Klebverbindungen immer geringere Festigkeiten als Lötverbindungen auf. Diese auf den ersten Blick nachteilige Eigenschaft kann jedoch durch großflächige Klebungen kompensiert werden. Dies bedingt eine dem Kleben angepasste Konstruktion und Gestaltung der Klebestellen.

*Die Kohäsion (innere Festigkeit des Klebstoffes)*

Die Silikatisierung von Oberflächen (Metalllegierungen, Reinmetallen und Keramiken) erfolgt in der Zahntechnik, um eine retentive Oberfläche und zusätzlich ein tribochemisches Verbundverfahren zu erhalten. Unter Tribochemie versteht man den Aufbau von chemischen Bindungen durch den Einsatz mechanischer Energie. Die zu beschichtende Oberfläche wird zunächst durch Bestrahlen mit einem 110 µm Aluminiumoxid-Strahlsand gereinigt. Der Auftrag von Kieselsäure oder Siliziumdioxid erfolgt durch Aufstrahlen eines geeigneten Aluminiumoxids, das entsprechend beschichtet ist. Die Keramisierung der bestrahlten Oberfläche erfolgt beim Aufprall der Körner. Dabei werden die betroffenen Oberflächen von Substrat und Strahlgut im atomaren und molekularen Bereich so stark angeregt, dass man von einem so genannten Triboplasma sprechen kann. Das SiO<sub>2</sub> wird dabei in die Oberfläche implantiert und gleichzeitig auf die Oberfläche aufgeschmolzen.

*Silanisieren*

Der nächste Schritt ist die Silanisierung, die ihrerseits dann die chemische Brücke zum Siliziumdioxid und zum Kunststoff schafft.

Anschließend können die Methacrylatgruppen mit den Monomeren des Kunststoffes copolymerisieren. Auf diese Weise wird schließlich der chemische Verbund zwischen Substrat (z. B. Metall) und Kunststoff erzielt. Dieser Kunststoff kann ein Verblendkunststoff, ein Opaker oder jedes andere methacrylierte Monomersystem sein. Für die Dentalkeramiken reicht eine Ätzung mit Flusssäure aus, um ein geeignetes retentives Oberflächen-



muster zu erzeugen. Die anschließende Silanisierung erreicht den Verbund des Silans zu den Siliziumdioxid-Molekülen der Oberfläche.

**Fazit: Kleben** Während des Abbindeprozesses entstehen aus den Klebstoffen die Klebschichten, die in ihren Eigenschaftsmerkmalen den Kunststoffen zuzuordnen sind. Erst die Kombination von Klebschicht und Fügeteiloberfläche ergibt die entsprechenden Haftungskräfte und somit einen wesentlichen Teil der Gesamteigenschaften, die für die Festigkeit einer Klebung von entscheidendem Einfluss sind. Aus diesen Faktoren ergibt sich dann das von Klebstoff zu Klebstoff unterschiedliche mechanische, physikalische und chemische Verhalten. Die besonderen Anforderungen an Klebschichten bestehen darin, die über die Fügeteile einwirkenden Kräfte zu übertragen. Dabei kommt dem Abbau bzw. der Reduzierung ggf. auftretender Spannungsspitzen eine besondere Bedeutung zu (Kohäsionsfestigkeit). Durch Klebstoffe können Werkstoffe gefügt werden, die einem thermische Fügeverfahren nicht zugänglich sind (Keramik-Metall, Kunststoff-Metall, Metall-Zahndentin bzw. -Schmelz und Keramik-Zahndentin bzw. -Schmelz).<sup>4</sup> Durch die elektrische und thermische Isolation durch den Klebstoff wird die Bildung von Lokalelementen und die damit verbundene Kontakt-Korrosion bei unterschiedlichen Metalllegierungen verhindert (z. B. Teleskope und Modellguss).<sup>7</sup>

**Das Löten** Unter Löten versteht man nach DIN 8505<sup>4</sup> ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes bzw. durch Diffusion an den Grenzflächen entsteht.<sup>7</sup> Im Gegensatz zum Schweißen wird die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe nicht erreicht. Die Solidustemperatur ist die untere Temperatur des Schmelzbereiches oder Schmelzinterwales des Werkstücks.<sup>11</sup> Durch Löten wird eine nicht lösbare, stoffschlüssige Verbindung hergestellt. Als Verbindungsmaterial dient meist eine leicht schmelzbare Metalllegierung, das Lot. Mit dessen Hilfe wird eine metallische Verbindung von zwei metallischen Werkstücken erzeugt. Ein Kennzeichen einer Lötverbindung ist die intermetallische Verbindung. In dieser dünnen Schicht bilden der Grundwerkstoff und das Lot eine Legierung und gehen eine feste Verbindung ein (Diffusionszone). Bei einer gelungenen Lötung legiert das Lot eine dünne Schicht der metallisch blanken Oberfläche auf. Die Wanderung der Metallatome, die dafür notwendig ist, nennt man Diffusion. Dementsprechend werden die sich ausbildenden Verbindungszonen auch als Diffusionszonen bezeichnet. Auf ihrem Bestehen und ihrem Umfang basiert die Festigkeit einer Lötstelle.

Eine erfolgreiche Lötung erhält man, wenn die Flächen, die den Lötspalt bilden, sauber, oxidfrei und metallisch blank sind. Die Lötfläche ist nach Möglichkeit parallelwandig und hat einen Spalt von 0,1 bis 0,2 mm (Abb. 3).<sup>3</sup> Ferner muss die Lötfläche ausreichend groß sein und zum Löten muss immer ein geeignetes Flussmittel, welches die zu fügenden Teile vor dem Sauerstoff schützt, vorhanden sein.<sup>21</sup> Die Erreichung einer über die gesamte Fläche der zu lötenden Werkstücke ausreichenden Arbeitstemperatur sowie ein geeignetes Lot für die Werkstücke sind unabdingbar (Abb. 4).<sup>29</sup>

Für die Flammenlötung sind bei dentalen Lötfügearbeiten somit ein geeigneter Brenner und die richtige Gaseinstellung sehr wichtig (Abb. 5 und 6). Das Löten ist die am weitesten verbreitete Handwerkstechnik, wenn es um dentale Fügungen geht.<sup>13</sup> Sie beherrscht der versierte Zahntechniker.



Abb. 3 Eine falsche Einstellung der Flamme: Das Gasgemisch ist zu stark und die Flamme zündet erst auf dem Objekt.



Abb. 4 Die korrekte Flammeneinstellung: Das Lot schießt in die Lotfuge.



Abb. 5 Große Objekte müssen gleichmäßig durchwärmt werden. Die Brennerauswahl ist hierbei wichtig.



Abb. 6 Eine falsche Brennerdüse und die falsche Vorbereitung: Hier geht alles in „heiße Luft“ auf.

Will man die Regeln der EN DIN 29333<sup>4</sup> einhalten und somit die Voraussetzungen nach dem Medizinproduktegesetz (kurz: MPG) erfüllen, stellt sich eine Dentallötung schon erheblich schwieriger dar. Diese DIN beschreibt die Anforderungen für eine dentale Lötung.<sup>4</sup> Sie ist damit in der Vorgehensweise der durchzuführenden Lötung sowie in den durch die Lötung entstandenen Stabilitäten die Hürde, die ein Zahntechniker zu nehmen hat.

Nicht alles, was unter dem Deckmantel der Dentallote zusammengefügt worden ist, kann man nach dieser Norm als ausreichend betrachten. Der Autor bezweifelt hier stark, dass es überhaupt eine den Regeln dieser Norm gerechte Handlungsweise im normalen Laboralltag gibt.<sup>17</sup>

Die in der Norm beschriebene Spaltbreite von 0,1 mm bis 0,2 mm, in die das Lot durch die Kapillarkraft einschießt, gibt es im Laboralltag sehr selten.

Das Durchschneiden einer Brücke wird in der Regel nicht gemacht, weil man heute mal wieder eine DIN Norm Lötung machen möchte, sondern weil das Werkstück leider ein zu großes Eigenleben auf dem Meistermodell besitzt.





Nach dem Zerschneiden mit einer Trennscheibe (die dünnsten sind 0,2 mm dick) wird das Werkstück auf dem Meistermodell rechts und links des Lötspaltes auf Passung gebracht. Genau dieser Vorgang bewirkt, dass sich unser Trennspalt unkontrolliert verändert. Das will man genau erreichen, denn die Differenzen sollen sich in dieser Fügezone kompensieren. Eine schaukelfreie Brücke ist unser Ziel.

Betrachtet man nun den Fügespalt, so hat er sich aus mehreren Gründen meistens ein wenig keilförmig und leicht verschoben dargestellt. Genau so und nicht anders soll man ihn nun durch die Lötung wieder zusammenfügen. Das heißt aber, dass dieser keilförmige Defekt, der keinen Kapillarspalt mehr darstellt, nun mit Lot aufgefüllt werden muss. So lötet der Zahntechniker durch Nachschieben des Bandlotes während der Arbeitstemperatur des Lotes so lange, bis das fehlende Volumen im Spalt aufgefüllt worden ist. Dies ist eher ein modellierender Vorgang als eine Lötung im klassischen Sinn der Lotfügearbeit. Das Schieben des Lotes wird durch das Anschwemmen aus der Rolle ersetzt. So bleibt in der Mitte immer eine im Lotspalt vorhandene Materialeigenschaft des ordinären Lotes bestehen, da die Diffusionszone nur im Bereich der Werkstückoberfläche erfolgt. Aber genau diese Veränderung in der Diffusionszone bringt dem Lot eine Verbesserung der Werkstoffeigenschaften. Wenn es dann zum Bruch kommt, kann man sicher sein, dass es genau in der Lötung passiert. Hier ist nun mal das Lot der schwächste Partner im Materialmix.

Das Lot wird mit Hilfe von Platinfolie und anderen höherschmelzenden Werkstoffen oft auch für andere Korrekturen herangezogen. So werden z. B. auch unkorrekte Ränder mit Hilfe der Lotrolle wieder in Form gebracht. Gelingt dann noch die Verblendung, so ist für den Techniker die Sache erst einmal erledigt.

Für den Patienten sieht das dann schon ganz anders aus. Diese Ränder sind häufig schon nach kurzer Zeit im Blickpunkt der kritischen Betrachtung. Nachteilig wirkt sich das Vorhandensein unterschiedlicher Metalle und Legierungen an Lötverbindungen aus.<sup>11</sup> Bei Anwesenheit eines Elektrolyts (z. B. Feuchtigkeit) entstehen galvanische Elemente wie ein Lokalelement, die zu verstärkter Korrosion führen können.<sup>1</sup> Die Mundhöhle ist dafür genau der richtige Ort. So sicher wie sich kein Zahntechniker eine im Kontaktpunkt oder im Kronenrand gelötete Krone in die eigene Mundhöhle zementieren lassen würde, muss man auch mit Kundenaufträgen verfahren.

Dass die Dentallote nach wie vor eine sehr starke Verbreitung haben, können uns die Scheideanstalten bestätigen. Die Lotmengen, die jährlich verkauft werden, sind konstant. Diese gleichbleibend große Menge steht in keinem Verhältnis zu den abgerechneten Lötungen. Also, wo sind sie geblieben, die teuersten Legierungen im dentalen Umfeld?

Um den Schmelzbereich des Lotes zu senken, werden Stoffe mit niedrigem Schmelzpunkt wie Kadmium, Zink, Nickel und Kupfer der „Lotlegierung“ beigemischt. Universelle Goldlotlegierungen enthalten etwa 75% Gold, 12 bis 18% Nickel und Zink.<sup>16</sup> Die Korrosionsbeständigkeit dieser Materialien ist jedoch fraglich und in vielen Fällen lösen sie sich einfach konstant im oralen Milieu auf. Die gelösten Metallionen können sich in den Organen absetzen (Nieren, Leber etc.) oder zu allergischen Reaktionen (zum Beispiel durch Nickel) und anderen Gesundheitsschäden für den Patienten führen.<sup>5</sup> Die Korrosion an gelöteten Teilen aus CoCr, die sich schon einige Zeit in situ befinden, ist leicht zu erkennen, wenn solche Teile zur Reparatur zurück ins Labor kommen. Die gelöteten Bereiche, die einst homogen und glänzend waren, erscheinen jetzt stumpf (meistens auch farblos) und porös, was ein klarer Beweis für Korrosion ist.<sup>24</sup> Solange man aber keine anderen



Alternativen hat, ist das korrekte Löten eine handwerkliche Leistung, die auch nach den Richtlinien des MPG zulässig ist.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die bekannten Nachteile der Lötverfahren nicht mehr akzeptiert werden müssen. Der Forderung, auf Lote zu verzichten und damit ein wenig biokompatibler zu werden, sollte gemeinsam Rechnung getragen werden. Bei den in der Zahntechnik heute vorhandenen hohen Standards ist der Verzicht auf Lötungen und die Eliminierung dieser Technologie sicherlich die Zukunftsorientierung. In einer Zeit, in der der Wettbewerb die zahntechnischen Leistungen immer mehr prägt, können nur Qualität und die Möglichkeit, biologisch unbedenklichen Zahnersatz herstellen zu können, ihren Preis und ihre Marktberechtigung erhalten.

*Fazit: Löten*

Die Weiterentwicklung anderer Fügeverfahren wie das Schweißen können hier klare Vorteile zugunsten der Patienten erreichen. Im Vergleich zum Löten braucht man beim Schweißen keine weitere Legierung mit niedrigem Schmelzbereich (Lote), um zwei Werkstücke miteinander zu verbinden. Das zum Schweißen verwendete Material hat stets die gleiche Zusammensetzung und die gleiche Farbe wie die zu schweißende Legierung. So gibt es selten Legierungsbestandteile mit niedrigem Schmelzpunkt, die korrodieren könnten, und die Schweißstelle hat eine vergleichbare Korrosionsbeständigkeit wie die ursprüngliche Gusslegierung.<sup>2</sup> Das gemeinsame Ziel dieser verschiedenen Methoden besteht darin, eine Vermischung der Atome, sei es der miteinander zu verbindenden Teile und/oder der zugeführten Materialien wie Lote oder Schweißstäbe, zu erreichen. Die gemeinsame Anforderung, die von all diesen Verbindungsmethoden (Löten/Schweißen) in allen Fällen erfüllt werden muss, ist eine Verbindungsstabilität von mindestens 350 MPa (in Übereinstimmung mit der Norm DIN EN 29333<sup>4</sup>).<sup>17</sup> Außerdem muss die Metallstruktur frei von jeglichen Makrodefekten, stabil und korrosionsbeständig sein. In der zahnheilkundlichen Literatur werden die verschiedenen Methoden im Licht der von der DIN-Norm gestellten Anforderungen diskutiert, mit einer klaren Tendenz zugunsten der Schweißtechniken.<sup>30</sup>

*Schweißen*

In die Zahntechnik wurde die Laseranwendung 1990 eingeführt; bei Dentallasern handelt es sich um Geräte mit gepulstem Laserstrahl.<sup>10</sup> Punktgenaues Schweißen gelingt mit allen Geräten, die in der Lage sind, durch Energieübertragung auf das zu schweißende Werkstück ihre Energieparameter auf einen bestimmten Fleck zu bündeln (Abb. 7).<sup>23</sup>

*Laserstrahl-Impuls-Schweißen*

Bei Dentallasern handelt es sich um Strahlschweißgeräte im Impulsverfahren, deren Steuerbarkeit einen Lichtblitz mit einem fokussierbaren Durchmesser von 0,2 bis 2 mm und unterschiedlicher Dauer von 0,5 bis 20 Millisekunden sowie einer Energieintensität bis maximal 5,5 KW ermöglichen.<sup>28</sup> Diesen für den einzelnen Schmelzimpuls zur Verfügung gestellten Energieparametern stehen verschiedene andere Faktoren gegenüber. Beim Lasern werden mit einem kurzen, sehr kräftigen Laserblitz Lichtquanten auf die metallische Oberfläche gebracht, um diese aufzuschmelzen. Die auftretenden Lichtquanten regen die Metallatome zum Schwingen an und erwärmen diese; durch die Wärmezufuhr in die Legierung erfolgt ein relativ schnelles Aufheizen des Metalls an der Oberfläche (Abb. 8).<sup>8</sup> Wird bei dieser Energiezufuhr der Schmelzpunkt oder das Schmelzintervall des Materials überschritten, so führt der Wärmestau zu einer punktuellen Aufschmelzung der bestrahlten Fläche.<sup>27</sup> Je nach Intensität, Zeit und Fläche der bestrahlten Ober-

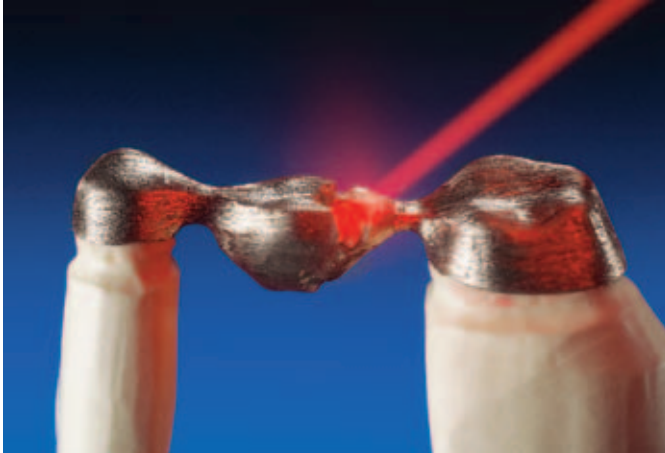


Abb. 7 Dort, wo man mit dem Laserstrahl hinkommt, kann man das Metall aufschmelzen. Die Fokuseinstellung und die Impulsdauer müssen dabei der Aufgabe entsprechen.



Abb. 8 Die Zugabe von artgleichem Material kann jederzeit erfolgen. Damit kann eine Kernzone immer weiter aufgebaut werden. Somit kann eine Laserschweißung unbegrenzt dick gemacht werden.



Abb. 9 Laserimpuls für Laserimpuls kann mit flüssigem Metall fast schon modelliert werden. Die Anzahl der Impulse soll immer der Aufgabe entsprechen. Grundsätzlich ist geringere Leistung bei mehr Impulsen immer Material schonender als weniger Impulse bei höherer Energie.

fläche ist diese Aufschmelzung gezielt reproduzierbar. Neben dem Schmelzpunkt bzw. dem Schmelzintervall des Materials sind die Wärmeleitfähigkeit eines Festkörpers sowie die Absorption wichtige Elemente beim dentalen Schweißen. Zum anderen ist es die Technik, die sicher beherrscht werden muss. Nach dem Zusammenfall der Blitzleistung erfolgt durch die fehlende Energie und das Abfließen der Wärme eine Erstarrung und somit eine Aushärtung des Schmelzbades (Abb. 9).



Abb. 10 Der Desktop Laser 3000 der Firma Dentaorium, Ispringen.



Die Lichtquanten eines Lasers können nicht allzu tief in eine metallische Werkstoffoberfläche eindringen; für das Aufschmelzen von Titan gehen z. B. annähernd 99,6% der ausgesendeten Lichtleistung als Reflexionsstrahlung in der Schweißkammer verloren.<sup>9,15</sup> Dies erklärt, dass beim Schweißen mit einem Laserstrahl fast 100% mehr Leistung als notwendig erzeugt werden muss. Silber hat eine Reflexion des Laserstrahls von 99,97% und ist daher mit einem Dentallaser schwer schweißbar.<sup>18</sup> Da aber eine so hohe Energie in dem Laserstrahl zur Verfügung steht, können alle dentalen Metall-Legierungen damit sehr gut verschweißt werden (Abb. 10).<sup>26</sup>

Der Zahntechniker, der seit Kurzem mit einem Dentallaser arbeitet, verfügt in der Regel nicht über die notwendigen Verfahrenstechniken. Daraus resultiert, dass ein Zahntechniker sein Wissen aus der Lötfügetechnik benutzt, um Laserverbindungen aufzubauen. Da Laserschweißen eine komplexe Technologie darstellt, muss diese Hürde durch eine gute Ausbildung der Mitarbeiter genommen werden.

*Fazit: Schweißen*

Die noch bestehenden Schwierigkeiten beim Laserschweißen müssen gemeinsam mit den Scheideanstalten und der Industrie dahin führen, dass gut laserbare Legierungen entwickelt und auf den Markt gebracht werden.<sup>6,14,22</sup>

Mit Hilfe einer intelligenten Abstimmung von Hochleistungselektronik und präziser, zuverlässiger Feinmechanik wurde ein hochwertiges Mikro-Lichtbogen-Impulsschweißgerät geschaffen, das sich u. a. durch minimale Baugröße, geringes Gewicht und einen kleinen Energieeinsatz auszeichnet. Hervorragende Zünd- und Schweißeigenschaften eröffnen ein breites Anwendungsgebiet für den Einsatz bei zahntechnischen Neuanfertigungen wie auch bei Reparaturen. Der primotec phaser as1 (primotec, Bad Homburg) (Abb. 11) ist ein Gerät zum Schweißen und Fixieren von zahntechnischen Arbeiten.<sup>30</sup> Er kann sowohl für Neuanfertigungen als auch zur Reparatur von metallischem Zahnersatz eingesetzt werden.<sup>20,25</sup> Mit ihm können alle gängigen Dentallegierungen und Monometalle (z. B. Titan) geschweißt werden.

*Plasmastrahl-Impuls-Schweißen*

Das Gerät ist mit einer besonderen Software ausgestattet. Diese Mess- und Regelsoftware bewirkt, dass permanent mit gleichbleibenden Energieparametern gearbeitet wird.<sup>12</sup> Der Kontakt erfolgt über eine Wolframelektrode zum Werkstück und schließt hierbei einen Stromkreislauf (Abb. 12). Vor Beginn des eigentlichen Schweißimpulses wird über ein Gasmagnetventil der Schweißbereich mit reaktionsträgem Argon geflutet und über die Wolframelektrode eine Widerstandsmessung des Objektes durchgeführt. Nun zieht sich die Wolframelektrode automatisch ins Handstück zurück und unterbricht hierbei den eigentlichen Messstrom. Genau dieser Unterbrechungsimpuls führt von Seiten der Software zur Auslösung des eigentlichen Schweißstroms. Hierbei befindet sich die Wolframspitze ca. 4 bis 5  $\mu\text{m}$  über der Werkstoffoberfläche, die über den Messstrom an der Berührungsstelle vorgewärmt wird.



Abb. 11 Der as1 Phaser der Firma primotec, Bad Homburg.



Abb. 12 Frei mit dem Handstück kann mit dem Phaser auf dem Modell gearbeitet und fixiert werden.

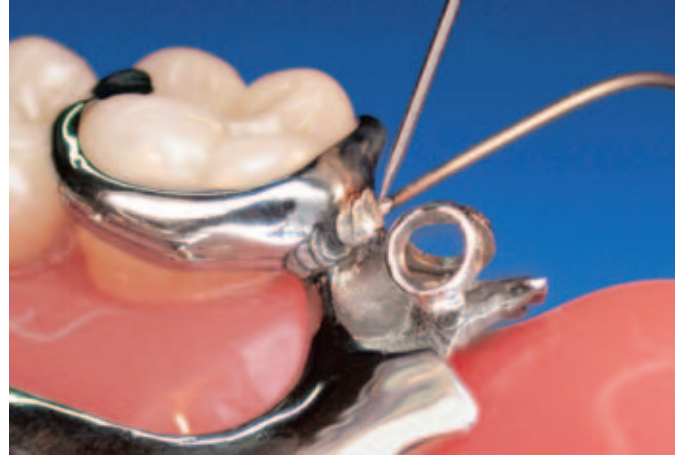


Abb. 13 Die Zugabe von artgleichem Material ist immer möglich und erfolgt unter direkter Sichtkontrolle des Zahntechnikers.



Abb. 14 Das Durchschweißen bis zu einer Tiefe von ca. 1,3 mm ist problemlos möglich.

Durch das Vorwärmen der metallischen Oberfläche geraten die Elektroden in einen erhöhten Bewegungszustand und können den Strom besser aufnehmen und leiten. Dieser minimale Abstand zwischen Elektrode und Werkstück reicht aus, um über das Argon einen Plasmastrahl zu erzeugen, der zwischen Werkstück und Elektrodenspitze entsteht (Abb. 13). Durch kontinuierliches Zurückziehen in das Handstück wird die Sonde permanent weiter von der Werkstückoberfläche zurückgezogen und der Plasmastrahl wird, wie ein Kaugummi, in die Länge gezogen. Der zeitliche Ablauf sowie die Leistung des Schweißstromes sind die für die Steuerung notwendigen Parameter. Sie ermöglichen es dem Zahntechniker, sehr schnell die gezielten Arbeitsschweißleistungen für die verschiedenen Metalllegierungen und Wandstärken einzustellen.

Ebenso kann über den Winkel zur Werkstückoberfläche die Eindringtiefe in das Werkstück manipuliert werden, sodass verschiedene Schweißgeometrien problemlos erzeugt werden können. Anders als bei anderen Systemen kann das Handstück des primotec Phasers, der sich in keiner Schweißkammer befindet, auch frei eingesetzt werden (Abb. 14). Unter dem Arbeitsmikroskop oder unter einer Lupenlampe, die durch einen Shutter gesichert sind, ist freies Arbeiten möglich.

Die freie Arbeitsweise auf dem Arbeitstisch ist hierbei von großem Vorteil, sodass das Arbeiten unter einem Shutter, der den Lichtblitz abmildert, oder mit der Schweißbrille problemlos akzeptiert wird.

**Fazit: Plasmastrahl-  
Impuls-Schweißen**

Wie auch beim Laserschweißen wird nach dem Erwerb eines Phasers nicht jede Metallverbindung gleich perfekt sein. Theoretisch ist das wie beim Klavierspielen: Wenn man im richtigen Augenblick die richtigen Tasten drückt, kommt dabei Musik heraus. Aber wie auch beim Klavierspielen muss man eine Weile üben, damit es sich auch für andere akzeptabel anhört.



Da auch das Mikro-Plasmaimpuls-Schweißen eine komplexe Technologie darstellt, muss diese Technik durch eine gute Ausbildung der Mitarbeiter begleitet werden.

In der Regel werden dentale Fügearbeiten dadurch notwendig, dass zahntechnische Objekte auf dem Meistermodell eine nicht perfekte Passung aufweisen. Eine gewisse Eigendynamik wie schaukeln oder wippen kann bei zahntechnischen Arbeiten aber nicht hingenommen werden. So wird eine Gerüstkonstruktion häufig geteilt und neu zusammengefügt. Ein Hauptproblem beim Schweißen ist das Entstehen von Verzügen. Verzüge lassen sich beim Schweißen nicht generell verhindern und stellen somit in der Schweißtechnik eine große Herausforderung dar. Unter Einsatz gezielter kleiner Arbeitstools, die zu diesem Schweißgerät entwickelt worden sind, kann fast verzugfrei gearbeitet werden (Abb. 15).

Die Lage der Verzüge kann so gesteuert werden, dass sie fast bedeutungslos sind. Die Hauptaufgabe des Schweißens besteht darin, eine Zuordnung bestimmter Geometrien auf einem Meistermodell beizubehalten und nach der Schweißtechnik keine räumlichen Veränderungen der geschweißten Objekte zu erfahren (Abb. 16 und 17). Da Verzug durch eine in der ersten Phase der Aufheizung entstehende Ausdehnung des Metalls erfolgt, wird sich durch die punktuelle Aufheizung an der Schweißstelle jeder metallische Werkstoff erst einmal ausdehnen. In der zweiten Phase baut sich durch den Übergang des Schmelzintervalls, von der festen in die flüssige Phase der Schmelze, diese Druckspannung wieder ab. Da aber nach wenigen Millisekunden der Energieeintrag beendet wird, kommt es durch die Ableitung der Wärme in das Werkstück (Wärmeleitfähigkeit des Metalls) und der damit verbundenen Abkühlung der Schmelze zum Erstarrungsprozess. Bei der Erstarrung werden die schwingenden Atome in das Metallgitter eingebunden und erfahren so eine Kontraktionsschrumpfung der Schmelze. Die Schmelze zieht sich zusammen und die atomare Bindungskraft der Atome, die sehr groß ist, sorgt dafür, dass sich die getrennten Objekte unkontrolliert aufeinander zu bewegen.

Da in der Regel nur bis zu einer Eindringtiefe ins Zentrum einer Verbindung gearbeitet wird, ergibt sich ein räumlicher Verzug nach oben und innen. Contralaterales Schweißen ist nicht in der Lage, diesen Verzug kontrolliert auszugleichen. Schon der erste Schuss von der Gegenseite löst eine andere Eigenschaft der Werkstücke aus, denn zu diesem Zeitpunkt befindet sich keine Trennung auf der Gegenseite, die frei reagieren könnte, sondern eine verschweißte Situation, die homogener und stabiler ist und einen viel größeren Widerstand der contralateralen Schweißung entgegenbringt. Eine ca. acht- bis zehnfach größere Schmelzkontraktion müsste ausgelöst werden, um diesen Verzug in umgekehrter Richtung zu kompensieren. Da dieser Vorgang nicht reproduzierbar ist, lassen sich auf diese Art Verzüge nicht kontrolliert wieder zurückbilden. Schon die Entstehung dieser räumlichen Veränderung muss unterbunden werden.

Hierzu ist ein Tool geschaffen worden, das sich Joker nennt. Der Joker hat sein Vorbild in einem Schraubstock gefunden. Die beiden zu schweißenden Teile werden so fest miteinander fixiert, dass die atomare Bindungskraft der Schmelze dieses nicht verändern kann. So kontrahiert die Schmelze in sich und wird, da sie zu diesem Zeitpunkt der wärmste und leicht verformbarste Bereich des Werkstückes ist, ins Zentrum der Schweißung kontrahieren (Abb. 18 und 19). Nach dem Erkalten kann man feststellen, dass die Schweißnaht schüsselartig nach innen eingesunken ist und die Kontraktionsschrumpfung

*Schweißtechnik: Laserimpuls- und Plasmaimpuls-Schweißen<sup>12</sup>*





Abb. 15 Der dentale Schraubstock „Joker“ (primotec).



Abb. 16 Mit dem Joker werden die Verzüge gesteuert. Diese sind zwar nicht zu verhindern, aber sie sind lenkbar geworden. Durch das Anschweißen an den Endpunkten wird der Modellguss stabiler gegen Verzug.



Abb. 17 Durch den Joker schließt sich der Kreis zwischen Bügel und Joker. Der Ring hat die größte Widerstandskraft gegen den Verzug.



Abb. 18 Das Schweißen beginnt mit dem Fixieren auf dem Modell. Erst wenn der fixierte Modellguss auf dem Modell perfekt sitzt, kann richtig geschweißt werden.

Abb. 19 Das Schweißen von NEM-Legierungen wird immer mit gezogenem Schweißzusatzwerkstoff unterstützt. Selbstgegossenes Material enthält zuviel Kohlenstoff. Die Schweißung wird durch den Kohlenstoff viel zu hart und zu spröde, die Schweißzone wäre stark aufgehärtet und könnte brechen wie ein Keks.





ausgelöst wurde. Ein Verhindern dieser Kontraktionsschrumpfung ist nicht möglich, aber es besteht die Möglichkeit, diese Schrumpfung ohne Beeinträchtigung der Arbeit zu lenken. Doch ein dentaler Schraubstock ist nicht in der Lage, eine schlechte Arbeitsvorbereitung auszugleichen. Jeder Trennspalt, der zwischen den beiden zu verbindenden Teilen der Werkstücke besteht, ist von Nachteil. Wenn nach dem Durchschneiden die räumliche Zuordnung der Objekte auf dem Meistermodell stattgefunden hat, sieht der Zahntechniker häufig einen keilförmigen Spalteffekt, da sich dieser Spalt nach dem Schneiden räumlich geografisch verändert. So besteht die eigentliche Schweißaufgabe darin, nicht nur zwei Werkstücke miteinander zu verbinden, sondern diese Luftbrücke mittels Materialzuführung auszugleichen. Diese Schweißtechnik ist aber wesentlich umfangreicher und schwieriger durchzuführen als wenn sich zwei Teile auf Stoß berühren und hierbei im Randbereich zirkulär miteinander verschmolzen werden. Da beim Mikroimpulsschweißen jeweils ein einzelner Schweißimpuls erfolgt, sind die umgebenden Bereiche, die nicht aufgeschmolzen werden, die Areale, die den räumlichen Abstand der getrennten Teile halten können. Befindet sich aber Luft zwischen den beiden Objekten, kann die Schmelze, die beim Erwärmen der Werkstückkanten miteinander zusammenläuft, während der Aufheizphase dieses Werkstück nicht auseinanderdrücken, da sich dieser Druck im Luftspalt verliert. Jedoch wird die Kontraktionsschrumpfung diese beiden Teile unkontrollierbar zusammenführen.

Da bei Schweißarbeiten versucht wird, mit relativ viel flüssigem Material eine Spaltsituation zu überbrücken, entstehen so starke Kräfte, dass ein räumlicher Verzug unvermeidbar ist. Für die Schweißtechnik ist es also von besonderer Bedeutung, eine Kontaktsituation zu schaffen, die nicht mit einem Schuss durchschmolzen wird, um eine Zusammenwanderung der Objekte zu verhindern. Dieses kann durch aufwändiges Aufschweißen der einzelnen Fügeflächen erreicht werden, die dann auf Passung geschliffen werden und einen Kontaktpunkt auf dem Modell drucklos berühren müssen. Allein diese Vorbereitung ist aufwändig und zeigt, dass in der Schweißtechnik gerade die Regeln des Verzuges und der Kontraktion beherrscht werden müssen. Ein wesentlich einfacherer und für den Zahntechniker leicht nachzuvollziehender Arbeitslauf kann so durchgeführt werden, dass nach dem Trennen einer Arbeit mit einer kreuzverzahnten parallelen Fräse mit einem Durchmesser von 1 mm ein Bohrkanal approximal durch die Schnittstelle geführt wird (Abb. 20 und 21).

Diese Präzisionsbohrung ermöglicht dem Zahntechniker anschließend einen passenden Draht in diese Bohrung einzufügen und so den Abstand mit einem Füllstück als Passung perfekt zwischen den beiden zu schweißenden Objekten aufzufüllen. Querschnitte bis 1,5 mm sind hierfür geeignet und bieten dem Zahntechniker in der Arbeitsvorbereitung unter minimalem Aufwand ein Maximum an Passung. Beim eigentlichen Zusammenfügen einer solchen Insert-Passung werden vier, jeweils bis zu einem Viertel im Drahtquerschnitt eingelagerte Schweißungen durchgeführt, und somit wird über dieses Insert eine spannungsfreie Verblockung der Arbeit erreicht. Zwischen den durch das Insert verblockten Teile kann die Aufteilung der Schweißnaht in verschiedene Teilbereiche erfolgen. Es erfolgt, unter Drahtzuführung von artgleichem Material, eine weitere Verschweißung der Schnittfuge. Bei diesen ersten Kontakten handelt es sich um eine Fixierung beim Schweißen, die nicht mit Voreindringtiefe durchgeführt wird. Nachdem auf diese Art eine zirkuläre Fixierung der Schnittkanten erfolgt ist, wird zwischen den Fixierpunkten



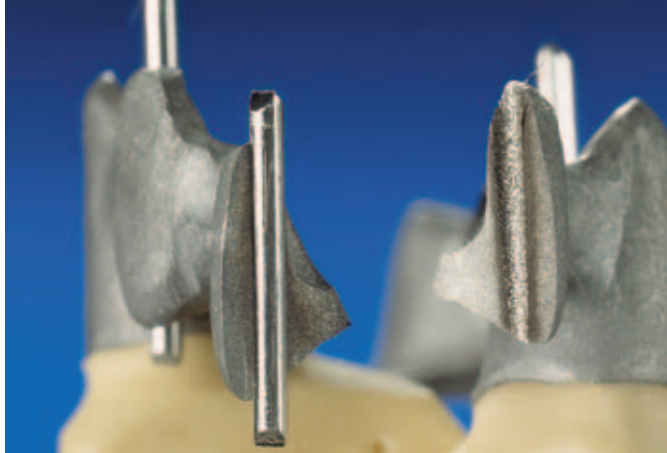


Abb. 20 Trennspalten werden ausgeglichen durch eine Interlockbohrung. Diese Bohrung überbrückt mit einem genau passenden Draht den Fügspalt.

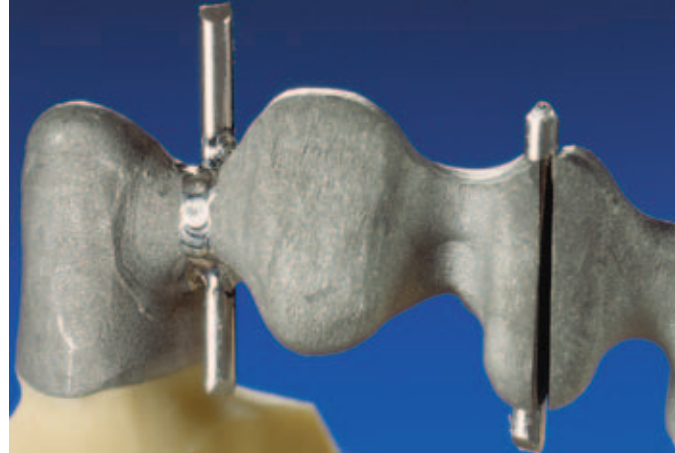


Abb. 21 Beim Schweißen können sich die Teile nicht zusammenziehen, da der Draht dazwischen den Abstand hält.

unter Zugabe von Schweißzufügmaterial eine wesentlich kraftvollere und tiefere Schweißung durchgeführt. Diese kann aufgrund der vielen, durch die Fixierung verbundenen Brückenteile nicht mehr zu einem Verzug führen, der die beiden Brückenteile zueinander zieht, da die Verblockungen größer sind als die in der Kontraktionsschrumpfung freiwerdenden Kräfte. Somit ist die Metallschmelze, die nun mit hoher Energieleistung zwischen die Fixierschüsse gesetzt wird, zwangsweise in die Position geschoben worden, dass sie in sich kontrahiert. Schrumpf lässt sich nicht verhindern, aber steuern und führt damit nicht mehr zu Veränderungen bei den beiden zu schweißenden Teilen. Lediglich im Volumen in der Tiefe der Schweißnaht entsteht eine konkave Schweißnaht. Diese kann durch Materialzufluss jederzeit aufgefüllt werden und mit Zulegematerial die ursprüngliche anatomische Form des zu schweißenden Bereiches wieder aufbauen.

Alle Fügeverfahren sind für das Microimpulsplasmaschweißgerät genauso vorzubereiten wie für die Laserschweißtechnik. Lediglich die Steuerung der Maschine ist anders, nicht jedoch das Ergebnis.

**Fazit** Das A und O der Zahntechnik besteht darin, die auf diese Verbindungstechnik wirkenden Kräfte zu beherrschen. Ein Mix aus den verschiedensten Kräften wie z. B. Schälbeanspruchung, Druckschärbeanspruchung, Torsionskräfte, Zugbeanspruchungen oder auch Druckbeanspruchungen wirken auf den Zahnersatz ein und werden in der Regel an solchen Verbindungsstellen in ihrer Art umgewandelt.

Genau in diesen Umwandlungsgebieten, wo Druck- in Zugkräfte gewandelt werden, werden häufig Verbindungstechnologien eingesetzt. Mit einer guten Ausbildung, den richtigen Einstellungen und der richtigen Technik kann mit jedem Schweißsystem perfekt gearbeitet werden. Reproduzierbare Werte, die nicht dem Zufallsprinzip folgen, sind bei der Herstellung von Zahnersatz nicht nur durch das MPG gefordert, sondern unterscheiden auch Handwerk „Made in Germany“ von manchem Stückwerk aus „Billiglohnländern“. Stimmen Fachwissen und Leistung, stimmt auch der Preis.



1. Angelini E, Pezzoli M, Rosalbino F, Zucchi F. Influence of corrosion on brazed joints strength. *J Dent* 1991;19:56–61. Literatur
2. Burstone CJ: Welding of TMA wire – clinical applications; *JCO* 21, 609 – 219 (1987).
3. Dielert E, Kassenbacher A. Lötungen, Mikroplasma- und Laserstrahlschweißungen an Dentallegierungen; *Dtsch Zahnärztl Z* 1987;42:647–653.
4. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN-Taschenbuch 267, Zahnheilkunde: Werkstoffe Normen und Gesetze, Richtlinien.
5. Dobberstein H, Dobberstein H. Laserschweißen von CoCr-Legierungen. *Zahntechnik* 1988;29:117–120.
6. Donovan MT, Jin-Jong Lin J, Brantley WA, Conover JP. Weldability of beta titanium arch wires. *Am J Orthod* 1984;85: 207–216.
7. Eichner K, Kappert HF. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, Band 1. Heidelberg: Hüthing, 1996.
8. Eshleman JR, Svitzer JR, Moon PC. Heat treatment of laser-welded gold alloys. *J Prosthet Dent* 1976;36:655–659.
9. Geis-Gerstorfer J, Weber H, Simonis A, Eckhardt M, Haselberger D: Zugfestigkeit von plasma- und lasergeschweißtem gegossenem Titan. *Dtsch Zahnärztl Z* 1990;45:545–547.
10. Gordon TE, Smith DL: Laser welding of protheses – an initial report. *J Pros Dent* 1970;24:472–476.
11. Gustavsen F, Berge M, Hegdahl T. Flexural strength of a high-temperature soldered cobalt-chromium alloy. *J Prosthet Dent* 1989;61:568–571.
12. Hopp M, Mosch J, Hoffmann A. Metallische Fügetechniken –eine Übersicht. *Dent Dialogue* 2004;5:40-50.
13. Hruska AR, Borelli P. Quality criteria for pure titanium casting, laboratory soldering, intraoral welding and a device to aid in making uncontaminated castings. *J Prosthet Dent* 1991;66:561–565.
14. Hruska AR, Zappe W. Intraorales Schweißen von Reintitan. *Quintessenz* 1988;39:35–48.
15. Jempt T, Bergendal B, Arvidsson K et al. Laser-welded titanium frameworks supported by implants in the edentulous maxilla: a 2-year prospective multicenter study. *Int J Proth* 1998;11:551–557.
16. Kassenbacher A, Dielert E. Werkstoffprüfung an laserstrahlgeschweißten bzw. gelöteten Gold- und CoCrMo-Dentallegierungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 1988;43:400–403.
17. Ludwig K. Lexikon der Zahnmedizinischen Werkstoffkunde. Berlin: Quintessenz, 2004.
18. NaBadalung DP, Nicholls JI. Laser welding of a cobalt-chromium removable partial denture alloy. *J Prosthet Dent* 1998;79:285–290.
19. Preston JD, Reisbick MH. Laser Fusion of selected casting alloys. *J Dent Res* 1975;54:232–238.
20. Roggensack M, Walter MH, Böning KW. Studies on laser- and plasma-welded titanium. *Dent Mater* 1993;9:104–107.
21. Sloan RM, Reisbick MH, Preston JD. Post-ceramic soldering of various alloys. *Prosthet Dent* 1982;48:686–689.
22. Smith DL, Burnett AP, Gordon TE. Laser welding of gold alloys. *J Dent Res* 1972;51:161–167.
23. Sjörgren G, Andersson M, Bergman M. Laser welding of titanium in dentistry. *Acta Odontol Scand* 1988;46:247–253.
24. Staffanou RS, Radke RA, Jendresen MD. Strength properties of soldered joints from various ceramic-metal combinations. *J Prosthet Dent* 1980;43:31–39.
25. Taylor JC, Hondrum SO, Prasad A, Broderon C. Effects of joint configuration for the arc welding of cast Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alloy rods in argon. *J Prosthet Dent* 1998;79:291–297.
26. van Benthem H, Vahl J. Untersuchungen zur Zerreißfestigkeit lasergeschweißter Dentallegierungen. *Dtsch Zahnärztl Z* 1978;33:262–266.
27. van Benthem H, Vahl J. Zum Korrosionsverhalten lasergeschweißter Dentallegierungen (3. Mitteilung). *Dtsch Zahnärztl Z* 1988;43:569–574.
28. Wang RR, Welsch GE: Joining titanium materials with tungsten inert gas welding, laser welding, and infrared brazing. *J Prosthet Dent* 1995;74:521–530.
29. Wiskott HWA, Macheret F, Bussy F, Belser UC. Mechanical and elemental characterization of solder joints and welds using a gold-palladium alloy. *J Prosthet Dent* 1997;61:607–616.
30. Zukunft D. Über einige werkstoffkundliche Untersuchungen zum WIGSchweißverfahren an Modellgußlegierungen. *Zahntechnik* 1980;21:148–150.

ZTM Andreas Hoffmann, Dentales Service Zentrum GmbH & Co. KG  
 Ludwig-Erhard-Straße 7b, 37434 Gieboldehausen  
 E-Mail: info@1DSZ.de

Adresse des Verfassers