

5 Diskussion

5.1 Fehlerbetrachtung

5.1.1 Probenherstellung

Es wurden Probenkörper (DIN EN ISO 1562 [24]) aus konfektionierten Wachskörpern hergestellt. Die Messung der gegossenen Probendurchmesser ergab geringe, tolerierbare Abweichungen von $\pm 0,06$ mm vom Mittelwert 3.02 mm.

Alle Wachskörper wurden zur Reproduzierbarkeit auf dieselbe Weise angestiftet und eingebettet, jeweils zwei Prüfkörper pro Gussmuffel.

Der Guss erfolgte mit den oben angegebenen fünf verschiedenen Gießmaschinen. Die Güsse der Prüfkörper erfolgten pro Serie (Gießgerät) direkt hintereinander, um eine Konstanz der Gießparameter zu gewährleisten. Besonders für den Flammenguss (Fundor T) war dies wichtig, da die Gaszusammensetzung manuell eingestellt werden musste.

Die Oberfläche wurde abgestrahlt und anschließend glanzgestrahlt. Das Abstrahlen bis zum Glanz soll eine homogene, glatte Oberfläche erzeugen. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Einkerbung soll reduziert werden, auch wenn dieser Einfluss bei den untersuchten Legierungen aufgrund ihrer hohen Duktilität gering sein sollte. Bei keramischen Werkstoffen wäre dieser Einfluss dagegen sicherlich nicht zu vernachlässigen.

Einige wenige Probekörper waren augenscheinlich leicht gekrümmt, was auf eine partielle Erwärmung der Wachskörper zurückzuführen sein könnte. Die Ergebnisse des Zugversuches korrelierten wider erwarten nicht mit der Krümmung der Proben, das heißt dieser Einfluss ist gering, zumindest bei den vorliegenden Abweichungen.

Bei der lichtmikroskopischen Untersuchung der Bruchflächen zeigten sich teilweise Lunker und Einschlüsse, die einen erheblichen Einfluss auf die Bruchdehnung hatten (siehe Kapitel 4, Tab.4,7,10,13,16). Die aufgrund dieser Inhomogenitäten erreichten Minimalbruchdehnungen lagen um 10-70 % unter den mit homogenen Bruchflächen erreichten Maximalbruchdehnungen. Der Einfluss auf die 0,2%-Dehngrenze, die Zugfestigkeit und den E-Modul lag zwischen 5-20 %.

Die Masse der Prüfkörper entspricht einer recht großen Brücke. Hierdurch kann es zu Schwindungen (Porositäten) kommen. Um die DIN EN ISO 1562 [24] zu erfüllen, wurde die dort empfohlene Anstifttechnik übernommen. Die für den Guss ungünstige Lage der Prüfkörper in der Muffel begünstigt die Entstehung von Lunkern. Gerade die belasteten schmalen Anteile der Probenkörper befanden sich in der Mitte der Muffel und damit im Hitzezentrum. Normalerweise würde der Zahntechniker Gerüste mehr zum Rand der Muffel drehen. Dies ist aber nach den Vorgaben nicht möglich.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Prüfkörperherstellung einen maßgeblichen Einfluss auf die Präzision, Reproduzierbarkeit und Richtigkeit hat. Durch sorgfältiges Arbeiten und strikter Einhaltung der Herstellerangaben lässt sich dieser Einfluss auf ein akzeptables Maß reduzieren.

Einzelne Ausreißer wurden nicht aus der Betrachtung genommen, wenn keine äußeren, sichtbaren Fehler (Einkerbungen, Porositäten, übermäßige Krümmungen der Zugstäbe u. ä.) zu beobachten waren.

5.1.2 Messungen

5.1.2.1 Eignung der Messmethoden

5.1.2.1.1 Zugversuch

Der Zugversuch wurde entsprechend der DIN EN 10002-1 durchgeführt [19], die festlegt, dass die Probekörper in einer Universalprüfmaschine mit tariertes Kraftmessdose zu dehnen sind bis sie zerreißen.

Mit einer Querschnittsgeschwindigkeit von 2 mm/min kommt es zu einer langsamen Belastungssteigerung, welche der Normvorgabe von $(1,5 \pm 0,5)$ mm/min entspricht.

In der Zahnmedizin wird diese Messeinrichtung häufig benutzt und hat sich zur Messung der mechanischen Eigenschaften als geeignet erwiesen [25,35]. Allerdings muss diskutiert werden, dass es in der Mundhöhle so gut wie nie zu reinen Zugbelastungen kommt, sondern meist zu Biege- oder Scherbelastungen, eventuell auch zu Druckbelastungen (auf den okklusalen Flächen). Ein Druckversuch liefert prinzipiell die gleichen Kenngrößen wie der Zugversuch. Da dieser sich vergleichsweise einfach durchführen lässt, wird er standardmäßig durchgeführt. Auch wenn der Zugversuch wenig mit der klinischen Situation zu tun hat, lässt er sich mit ihr

in Übereinstimmung bringen. Die Kenngrößen, die aus ihm gewonnen werden, bieten dem Zahnarzt und –techniker wichtige Beurteilungshilfen für die Legierungen.

Die im Zugversuch gemessenen Werte liegen dicht bei den vom Hersteller für die jeweiligen Legierungen angegebenen Werten, außer geringer Abweichungen für die Legierung Bio PlatinLloyd. Damit ist die prinzipielle Richtigkeit der Messungen belegt.

5.1.2.1.2 Härte

Die Prüfung der Härte nach Vickers ist für Metalle gut geeignet und ist für die Härtebestimmung von zahnärztlichen Werkstoffen üblich [54,55,74]. Die Härte gilt als Maßstab für die zahntechnische Oberflächenbearbeitbarkeit. Auch ist sie bei unverblendeten Flächen wichtig, wenn diese in Kontakt zu natürlicher Zahnhartsubstanz stehen. Eine Abrasion dieser ist zu vermeiden.

Nach DIN EN ISO 1562 [24] geben die Hersteller die Härte der Legierung ebenso in Vickers an. Sie benutzen eine Belastung von 5 kp bei einer Haltezeit von 30 s (HV 5/30).

Für eine Vergleichbarkeit wurde die Härteprüfung unter den gleichen Bedingungen durchgeführt.

Es wurden im Zentrum der Probe drei Eindrücke gesetzt und der Mittelwert aus den jeweiligen drei Härtewerten berechnet.

Die Mittelwerte weichen leicht von den vom Hersteller angegebenen Härtewerten ab. Bei den Legierungen Bio PontoStar, PontoLloyd L und PlatinLloyd 100 wurden höhere Härtewerte ermittelt und bei den Legierungen PontoLloyd G und Bio PlatinLloyd niedrigere Werte.

Wichtig war, dass die ermittelten Werte reproduzierbar waren, was durch die gleichen Prüfbedingungen begründet war.

5.1.2.1.3 Gefügeuntersuchung

Da es für die Gefügeuntersuchung kein standardisiertes Verfahren gab, gestaltete diese sich etwas schwieriger.

Eine Ätzung mit einem Gemisch aus 100 ml destilliertem Wasser, 10 g Kaliumcyanid und einigen Tropfen Wasserstoffperoxid 3 %, wie sie für Goldlegierungen am

geeignetsten angegeben wird [63,47], wäre aufgrund der Giftigkeit des Kaliumcyanids (Arbeitssicherheit) nicht genehmigt worden. So musste auf die Mischung aus einem Teil Salpetersäure und 10 Teilen Salzsäure zurückgegriffen werden. Die Ätzzeit wurde durch Ausprobieren ermittelt und lag zwischen 5 Minuten für Bio PontoStar und 14 Minuten für PontoLloyd L.

Günstige Ätzungen konnten bei den Legierungen Bio PontoStar und PontoLloyd G erzielt werden. Die Legierungen Bio PlatinLloyd und PontoLloyd L ließen sich besonders ungünstig ätzen, was die Auswertung erschwerte.

Die Messung der Korngröße erfolgte mit dem Computer, der eine Fläche in μm^2 maß, nachdem diese per Mouseklick umfahren wurde. Hierbei wurden nicht immer alle auf dem Bild dargestellten Körner gemessen. Es wurden nur die eindeutig erkennbaren Korngrenzen nachgefahren. Bei den schwer ätzbaren Legierungen musste subjektiv abstrahiert werden, da viele Korngrenzen nur zu erahnen waren.

Eine weitere Fehlerquelle stellte die Auswahl des zu untersuchenden Gebietes auf der Probe dar. So waren bei der Legierung PlatinLloyd 100 die Körner im Zentrum der Probe bedeutend größer als in der Peripherie, während bei Bio PontoStar sich die größeren Körner peripher befanden und sich im Zentrum besonders kleine Körner häuften.

Die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung brachte keine zusätzlichen Erkenntnisse, da die schwer ätzbaren Legierungen dafür nicht geeignet waren.

Aus diesen Gründen sollte das Ergebnis, welches dem Schleudergussverfahren den Vorrang gibt, hier nur als Tendenz gesehen werden.

5.2 Diskussion der Messergebnisse

Die Messwerte der Zugprüfung lagen über der in DIN EN ISO 1562 [24] vorgegebenen Mindest-0,2%-Dehngrenze, außer bei einzelnen Einbrüchen vor allem in den Messwerten der Bruchdehnung, die allesamt auf besonders große oder besonders viele Lunker und Einschlüsse im Bereich der Bruchfläche zurückzuführen sind.

Signifikante Unterschiede zwischen den Gussystemen gab es kaum. Die wenigen Unterschiede widersprachen sich, so dass hier den Autoren Recht gegeben werden kann, die keinem Gussverfahren den Vorzug geben können [34,51,58,45]. Hier

scheinen individuelle Unterschiede in dem händischen Prozess vorzuliegen, die unabhängig vom Gießverfahren sind.

Die Legierung Bio PontoStar reagierte in den Untersuchungen empfindlicher auf Verarbeitungsunterschiede mit einer größeren Streubreite der Ergebnisse für den Zugversuch und die Härtemessung.

Besonders verarbeitungsunabhängig verhielt sich die Legierung PlatinLloyd 100 mit sehr konstanten Einzelwerten. Inwieweit der hohe Kupfergehalt (9,8 m%) dafür verantwortlich gemacht werden könnte, kann hier nicht ausreichend diskutiert werden.

Die Ergebnisse der Gefügeuntersuchung geben dem Schleudergussverfahren den Vorteil im Gegensatz zu den Angaben von KÖRBER und RAU, welche mit dem Vakuum-Druckguss günstigere Ergebnisse erzielten [65,49]. Allerdings sind die Ergebnisse aus den unter 5.1.2.1.3 genannten Gründen nur eingeschränkt aussagefähig.

Die Legierung Bio PontoStar lieferte hier im Gegensatz zum Zugversuch und der Härteprüfung besonders verarbeitungsunabhängige Gefüge. Sie ist die Legierung mit der kleinsten Korngröße und dem homogensten Gefüge. Die Standardabweichung ist hier mit unter $300 \mu\text{m}^2$ sehr gering. Bio PontoStar enthält den größten Prozentsatz an Platinmetallen, welche für das wesentlich feinkörnigere Gefüge verantwortlich gemacht werden [26,62].

Besonders grobkörnig erstarrte PlatinLloyd 100, die Legierung mit dem geringsten Gehalt an Platinmetallen.

Die Gussmaschine Fundor T, welche mit einer offenen Flamme die Legierung manuell erhitzt, wodurch die Gefahr der Überhitzung gegeben ist, brachte in der Gefügeuntersuchung die günstigsten Ergebnisse mit der kleinsten mittleren Korngröße in der Rangfolge, dicht gefolgt von den anderen Schleudergussverfahren.

Bei der lichtmikroskopischen, subjektiven Beurteilung der Bruchflächen nach dem Zugversuch lieferte die Vakuum-Druckguss-Maschine Nautilus MC+ homogene Bruchflächen mit weniger Lunkern und Einschlüssen als die anderen Gussysteme.

Dieser Vorteil spiegelt sich aber nicht in den Ergebnissen des Zugversuchs, der Härte und der Gefügeuntersuchung wider. Die Duktilität der verarbeiteten hochgoldhaltigen Legierungen scheint kleinere Inhomogenitäten im Gefüge im Zugversuch auszugleichen, was eine hohe Verarbeitungsbreite bedingt. Dies ist als günstig zu bewerten.

Dieser Vorteil spiegelt sich aber nicht in den Ergebnissen des Zugversuchs, der Härte und der Gefügeuntersuchung wider. Die Duktilität der verarbeiteten hochgoldhaltigen Legierungen scheint kleinere Inhomogenitäten im Gefüge im Zugversuch auszugleichen.

5.3 Klinische Bedeutung

Aus werkstoffkundlicher Sicht sind alle Gusssysteme gleich zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Untersuchung können also nicht die Entscheidung des Technikers für oder gegen ein bestimmtes Gusssystem beeinflussen.

Die Mundbeständigkeit einer Legierung steigt, je feinkörniger und homogener das Gefüge ist. In diesem Falle sprechen die metallurgischen Befunde für das Schleudergussverfahren.

Es ist hinreichend bekannt, dass Metalle der Platingruppe als Legierungsbestandteil die Feinkörnigkeit einer Legierung steigern. Die Legierung Bio PontoStar ist im Sinne der Feinkörnigkeit und Homogenität besonders zu empfehlen.

Für den Zahnarzt und Patienten bedeutet die vorliegende Untersuchung, dass gleich bleibende und vom Gusssystem unabhängige Gussergebnisse gewährleistet sind.