

## **2 Literaturübersicht**

### **2.1 Nichtedelmetall Legierungen in der Zahnheilkunde**

#### **2.1.1 Überblick**

##### **2.1.1.1 Kobalt-Chrom-Legierungen**

Kobalt-Chrom-Legierungen haben in Deutschland den größten Marktanteil der Nichtedelmetalllegierungen. Ihre Zusammensetzung beruht auf 54 – 70 % Kobalt, 20 – 31 % Chrom sowie Molybdän, Mangan, Silizium, Wolfram oder Eisen.

Bei den Kobalt-Chrom-Legierungen für die Teilprothetik ist zusätzlich Kohlenstoff in minimalen Anteilen enthalten, um die Festigkeit (durch Bildung von Karbiden) zu steigern.

Die hohe Härte und Festigkeit dieser Legierung wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Kobalt ändert beim Erstarren in einer Umwandlungsphase (Beginn bei 417 °C) seine kristalline Form. Durch die Ausbildung feiner Nadeln, die sich ineinander verkeilen und die Einlagerung von Chromatomen wird die hohe mechanische Festigkeit erreicht. Die chemische Beständigkeit wird durch eine Passivierungsschicht hervorgerufen, welche durch die Oxidation von Chrom entsteht. Diese erfolgt sehr rasch, selbst bei einem kurzzeitigen Entfernen der Schicht durch Abschleifen, bildet sich diese so schnell neu, dass es dabei zu keinerlei Schädigung kommt [64].

Kobalt-Chrom-Legierungen weisen auch im feuchten Mundmilieu eine gute Korrosionsbeständigkeit auf, weil die Oxidschicht des Chroms weitgehend erhalten bleibt. Wird anstelle von Molybdän Wolfram verwendet, benötigt man in etwa die doppelte Menge, um vergleichbare Eigenschaften zu erzielen [20, 55, 22].

Standardmäßig enthalten Kobalt-Chrom-Legierungen einen Zusatz von 5 % Molybdän. Dieses schützt die Legierung vor Aufkohlung beim Gießen, indem es mit den Kohlenstoffatomen Karbide bildet und zusätzlich wird durch Molybdän die Dehnbarkeit erhöht [32].

Mangan wirkt als Antioxidationsmittel und verbessert die Verarbeitbarkeit, während Silizium das leichtere Ausgießen der Schmelze begünstigt [62].

### **2.1.1.2 Nickel-Chrom-Legierungen**

Diese Legierungen wurden entwickelt, um aufbrennfähige NEM-Legierungen zu erhalten und somit eine Alternative zu den kostenaufwendigerem EM-Legierungen zu haben.

Legierungen auf Nickelbasis enthalten Chrom in einer Größenordnung von 15 bis 20 %, teilweise auch darüber hinaus. Der Nickelgehalt liegt bei 70 %, des Weiteren sind Molybdän, Aluminium, Silizium und Mangan enthalten [20, 62].

Nickel selbst ist weithin als Allergen aus der Modeschmuckindustrie bekannt [30]. Der durch korrosive Vorgänge im Mund freiwerdende Nickelanteil der Legierung ist der bestimmende Anteil einer möglichen Sensibilisierung.

Liegt der Anteil des Chroms unter 15 % und der des Molybdäns unter 4 Prozent, so reicht die gebildete Passivierungsschicht nicht aus, um die Freisetzung von Nickel zu verhindern. Bei einem Chromgehalt von über 20 % und einem Molybdängehalt von mindestens 4 Prozent gilt aber auch bei diesen Legierung eine gute Korrosionsresistenz als gesichert [63, 64].

Nickel-Titan-Legierungen werden in der Kieferorthopädie als elastische Drähte (Nitinol) verwendet [20].

### **2.1.1.3 Eisenlegierungen**

Eisen-Kohlenstoff-Legierungen werden als Stähle bezeichnet. Beträgt der Anteil an anderen Legierungskomponenten mehr als 5 %, nennt man sie Edelstähle - in dieser Form werden sie als Drähte, Implantate oder Zubehör in der Zahnmedizin verwendet. Sie enthalten etwa 18 % Chrom, 8 – 8,5 % Nickel und 0,06 – 0,08 % Kohlenstoff.

Bei einer Temperatur über 1100 °C bilden sie homogene Eisen-Kohlenstoff- Mischkristalle (Austenit). Durch den Nickelgehalt und dem Abschrecken nach dem Schmelzen wird das Austenitgefüge auch bei Raumtemperatur erhalten. Dieses verleiht dem Stahl eine sehr gute Kaltverformbarkeit und bewirkt, dass die Härte und Zugfestigkeit mit dem Grad der Verformung zunehmen, wobei die Dehnbarkeit reduziert wird [12].

#### 2.1.1.4 Titan und Titanlegierungen

Titan hat ein niedriges spezifisches Gewicht, eine hohe Festigkeit und eine gute Korrosionsbeständigkeit. Bei Raumtemperatur liegt Titan in einer Kristallstruktur vor, welche als hexagonale  $\alpha$ -Phase bezeichnet wird, die sich aber bei 882,5 °C in die kubisch raumzentrierte  $\beta$ -Phase umwandelt.

Je nachdem, welche Eigenschaften von besonderem Interesse sind, lässt sich durch Zugabe von Legierungskomponenten die  $\alpha$ - $\beta$ -Umwandlung nach oben oder unten auf der Temperaturskala verschieben. Die  $\beta$ -Phase kann sich auch bei Raumtemperatur stabilisieren.

Als  $\alpha$ -stabilisierend haben sich Aluminium, Zinn, Gallium, Indium, Zirkonium, Kupfer sowie Hafnium und als  $\beta$ -stabilisierend Vanadium, Molybdän, Nickel, Tantal, Eisen und Chrom erwiesen. Dementsprechend teilt man Titanlegierungen in  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\alpha$ - $\beta$ -Legierungen ein. Der Anteil des Titans liegt um die 90 %.

Auch Titan bildet bei Kontakt mit Sauerstoff schnell eine Oxid-Passivierungsschicht aus und ist dadurch vor Korrosion geschützt [64].

Wegen der hohen Schmelztemperatur von etwa 1670 °C wird Titan mit dem Lichtbogenverfahren (2.2.2.2) in einem luftverdünnten Raum unter Schutzgasspülung aus Argon gegossen [32]. Aufgrund der sehr kurzen Schmelzzeit muss der Gießzeitpunkt elektronisch gesteuert [32].

Reintitan im herkömmlichen Sinne gibt es nicht, weil Begleitelemente im Kristallgitter gelöst bleiben. Diese kommen durch Verunreinigungen des Rohstoffes zustande. Deshalb nennt man es auch unlegiertes Titan [20, 62, 30].

## **2.2 Der Dentalguss**

### **2.2.1 Überblick**

Heutzutage sind hauptsächlich zwei Gussverfahren in Gebrauch: Der Schleuderguss und der Vakuum-Druckguss.

Beim Schleuderguss wird die Schmelze in die um eine Achse rotierende Gießform geschleudert, wobei durch die Zentrifugalkraft das Ausfließen der Schmelze bis in die grazilsten Partien der Gießform bewirkt wird. Beim Vakuum-Druckguss wird die Schmelze nach Erreichen der Gießtemperatur durch die Schwerkraft in die evakuier-te Gießform befördert und mit zusätzlichem Druck bis in die grazilsten Teile des Formhohlraumes gepresst.

Mit welchem Verfahren denn nun die besseren Ergebnisse erzielt werden können, ist seit geraumer Zeit reichlich diskutiert worden, jedoch ohne ein handfestes Ergebnis zu erreichen. Beim Sichten der umfangreichen Literatur ergaben sich Unterschiede in den Bewertungen der jeweiligen Gussqualitäten.

Für das dem Gießen vorangestellte Schmelzen der Legierung bis zu der geforderten Schmelztemperatur gibt es ebenfalls verschiedene Verfahren. So gibt es die Mög-lichkeit unter Verwendung eines Gasgemischs die Legierung mit einer Flamme zu Schmelzen, aber auch mit dem Lichtbogen-Verfahren, der Widerstandsheizung oder der Hochfrequenz-Induktionsheizungs-Methode ist das Verflüssigen der Legierung durchführbar.

## **2.2.2 Schmelzverfahren**

### **2.2.2.1 Schmelzen mit der offenen Flamme**

Das Schmelzen der Legierung erfolgt mit einem Brenner, der mit einem Gasgemisch aus Luft oder Sauerstoff und Erdgas, Propan bzw. Acetylen betrieben wird.

Eine unkontrollierte, ungleichmäßige Aufheizung und Überhitzung der Legierung ist möglich, wodurch es zu Oxidierung der Legierung und Einlagerung von Gasen kommt. Als Folge dieser Vorgänge kann zur Versprödung der Legierung führen [65]. Auch Schwefelschäden durch das Zersetzen der Einbettmasse aufgrund der überhitzten Schmelze sind möglich. Die Kontraktion der Legierung wird ebenfalls unberechenbar, so dass es vermehrt zu einer Lunkerbildung kommt [77].

Die besten Erfahrungen machte UEBE mit der Kombination Erdgas-Pressluft, wobei er gleichzeitig betont, dass das Schmelzen mit der Flamme eher der Vergangenheit angehört [71]. WULFEN verglich das Flammenschmelzen mit der Induktionsheizung und stellte fest, dass das Schmelzen mit der Induktionsheizung vorzuziehen ist. Der Hauptgrund liegt in der sicheren Schmelzföhrung beim induktiven Schmelzen [54].

BRÄMER und KREUTZER sehen besonders in den unverzichtbaren, hohen Sicherheitsvorkehrungen ein Nachteil des Flammenschmelzverfahrens. Auch sie weisen auf die Gefahr der Überhitzung und bei unvollständiger Verbrennung der Flammengase auf eine mögliche Gasaufnahme der Schmelze hin [11].

### **2.2.2.2 Schmelzen mit Lichtbogen**

Der Gleichstrom-Lichtbogen wird zwischen zwei Elektroden erzeugt, von denen eine durch die Legierung, die andere durch eine wassergekühlte Wolfram-Elektrode gebildet wird. Der dabei entstehende Lichtbogen wird durch ionisierte Gase weitertransportiert. In der Regel verwendet man hierfür Argon. Das Gas dient gleichzeitig als Schutzgas [32].

Es können Temperaturen von über 4000 °C erreicht werden, weshalb man dieses Verfahren gut für Titangüsse verwenden kann. Das Metall schmilzt sehr schnell auf, daher ist die Überhitzungsgefahr bei diesem Verfahren besonders groß [26] und aus diesem Grund sollte eine elektronische Steuerung des Gießzeitpunktes erfolgen [32].

WEBER hält dieses Verfahren zur Bearbeitung von NEM-Legierungen für besonders geeignet, da für diese hohe Schmelztemperaturen nötig sind [73].

### **2.2.2.3 Schmelzen mit Widerstandsheizung**

Bei der Widerstandsheizung kommt das zu schmelzende Metall in einen Kohletiegel, um den eine Heizspirale gelegt ist. Durch eine teilweise Oxidation des Tiegel-Kohlenstoffs entsteht eine Kohlenmonoxid, bzw. Kohlendioxid angereicherte Atmosphäre. Dadurch wird die Oxidation des zu schmelzenden Metalls durch den Luft-sauerstoff verhindert. Mit der Widerstandsheizung lassen sich so Temperaturen von maximal 1500 °C erreichen [32].

Der Vorteil dieser Heizmethode ist die exakte Steuerung der Temperatur. Somit wird einer Überhitzung entgegengewirkt [26].

UEBE sieht als einen wesentlichen Vorteil die schonendere Behandlung des Gussmaterials im Vergleich zum Flammenschmelzen [71]. Auch HOHMANN und HIELSCHER halten aufgrund der akkurat einstellbaren Gusstemperatur eine Überhitzung für nahezu ausgeschlossen [32].

Als Nachteil dieses Verfahrens geben BRÄMER und KREUTZER die hohen Investitionskosten und längere Schmelzzeiten im Vergleich zur Flammenapparatur an. Dennoch heben sie den gut kontrollierbaren Schmelzprozess [11].

### **2.2.2.4 Schmelzen mit Hochfrequenz-Induktionsheizung**

Die funktionell wichtigsten Teile einer Induktions- oder Hochfrequenzschmelzanlage sind ein keramischer Schmelztiegel und eine ihn umgebene Induktionsspule, durch die ein hochgespannter Wechselstrom fließt (Frequenz 10000 – 20000 Hz).

Dieser induziert in der in dem Tiegel befindlichen Legierung Wirbelströme, die sie in sehr kurzer Zeit zum Schmelzen bringt (30 – 50 Sekunden) [77].

Temperaturen bis zu 2000 °C sind mit diesem Verfahren möglich.

## **2.2.3 Gussverfahren**

### **2.2.3.1 Druckguss**

Der Druckguss erfolgt durch komprimierte Luft oder komprimierten Wasserdampf, bzw. Stickoxide, so dass das Einfließen der flüssigen Schmelze in die vorgewärmte Gussmuffel durch einen Überdruck erreicht wird.

Die Muffel befindet sich in senkrechter Position, wobei nach UEBE die Gefahr einer Oxidation gegeben ist [71].

### **2.2.3.2 Schleuderguss**

Beim Schleuderguss wird die Schmelze in die um eine Achse rotierende Gießform geschleudert, wobei durch die Zentrifugalkraft das Ausfließen der Schmelze bis in die graziesten Partien der vorgewärmten Gießform bewirkt wird [26].

Die einfachste Form ist eine Handschleuder, die auch zuerst angewendet wurde. Um eine höhere Rotationsgeschwindigkeit und damit größere Zentrifugalkraft zu erreichen, wird eine vorgespannte Feder benutzt. Sie ist mit dem Schleuderarm verbunden an dem die Gussvorrichtung angebracht ist [77].

Zu beachten ist, dass die Zentrifugalkraft eine Vektor-Größe ist. Nur in Richtung des Schleuderarms wirkt die gesamte Kraft. Liegt das Gussobjekt um einen bestimmten Winkel außerhalb dieser Richtung, so wirkt die Kraft nur noch anteilmäßig. Das bedeutet, dass innerhalb der Gussform die Zentrifugalkraft unterschiedlich stark wirkt.

### **2.2.3.3 Vakuum-Druckguss**

Beim Vakuum-Druckguss sind Muffel und Schmelzofen in einem geschlossenen System. Die Schmelze wird nach Erreichen der Gießtemperatur durch die Schwerkraft in die evakuierte Gießform befördert und mit zusätzlichem Druck (2-3 atü) in die Hohlform gepresst. Der Druck der Pressluft wirkt gleichmäßig sowohl auf die gesamte Gussform als auch auf die Schmelze. Der Druck der einschließenden Schmelze ist in der gesamten Hohlform gleich.

Die in Schleudergussmaschinen manchmal auftretenden Kohlenstoffeinschlüsse durch mitgerissene Russpartikel sind hier ausgeschlossen, da die Schmelze sehr langsam einfließt, so dass sich der Russ aufgrund seines kleinen spezifischen Gewichtes auf der Oberfläche des Gusskegels absetzen kann [71, 36].

Als weiteren Vorteil sieht KÖRBER die Nähe des glühenden Tiegels zur Gussmuffel, weil dadurch die gerichtete Erstarrung unterstützt wird [36].

#### **2.2.3.4 Saugguss**

Beim Saugguss wird die flüssige Schmelze in den Gusseingangstrichter gegeben und die Gussmuffel wird von der dem Eingangstrichter gegenüberliegenden Stirnseite evakuiert. Dadurch wird das Metall in die Hohlform eingesogen.

Dieses Verfahren wird jedoch nicht in der Dentaltechnik verwendet. Mit dem Saugguss werden aber z. B. die Gussstücke (Ingots) hergestellt, die der Zahntechniker als Halbzeug einsetzt.

Als Halbzeuge bezeichnet man in der Fertigung solche bereits vor- oder zubereiteten Rohmaterialien, die in größeren Abmaßen vorliegen. Dabei wird ein Halbzeug in der Regel so ausgewählt, dass eine Dimension (beispielsweise der Durchmesser oder die Dicke) bereits der entsprechenden Dimension des herzustellenden Produktes bestmöglich entspricht; in den anderen Dimensionen (Länge, Breite) wird das Halbzeug auf die jeweils benötigten Abmaße zugeschnitten.

#### **2.2.3.5 Strangguss**

Das Verfahren wird kontinuierlich durchgeführt. Dafür wird eine bodenlose gekühlte Kokille (wieder verwendbare Form zum Gießen von Metallen und Legierungen) verwendet, in die das flüssige Metall gegossen wird. Innerhalb der Kokille erstarrt die Strangschale, die dann in Gießrichtung abgezogen wird und den flüssigen Kern umschließt. Nach dem Verlassen der Kokille wird die Strangschale weiter mit Wasser gekühlt, bis der Strang vollständig erstarrt ist. Entsprechend der Kokillenanordnung wird zwischen horizontalem und vertikalen Stranggießen unterschieden [59]. Auch dieses Verfahren wird nur zur Herstellung von Halbzeug verwendet.

### 2.2.3.6 Vergleichende Untersuchungen

SPRENG lehnt den Luftdruckguss wegen des Vorkommens von Gasblasen im Gussobjekt ab und gibt dem Wasserdampfdruckverfahren den Vorzug [53].

ANDERSON meint, die Schmelze könnte durch die Pressluft eine Abkühlung erfahren [1]. KYSELOVA, KYSEOLA und MARES stellten röntgenologisch bei den durch Luft- oder Dampfdruck hergestellten Gussobjekten tropfenförmige Defekte verschiedener Größe, zum Teil in erheblichem Ausmaß fest. Beim Schleuderguss blieben diese Defekte aus, ebenso bei der Herabsetzung des Einpressdruckes bei den Gasdruckgeräten. Die Vermutung lag daher nahe, dass beim Guss Druckluft in die Form mitgerissen wurde und ursächlich das Auftreten der Defekte bewirkte [40].

HARASZTHY kam in seinen Untersuchungen mit dem Schleuderguss zu günstigeren Ergebnissen und bemängelte mangelnde Vollständigkeit der Prüfkörper, die mit dem Druckguss hergestellt wurden. Weiterhin erschienen ihm die größeren Möglichkeiten der Muffelgestaltung beim Schleuderguss wichtig [24].

HOLLENBACK schätzt das Gießen mit Luftdruck günstiger ein als den Schleuderguss [33].

Obwohl auch beim Schleuderguss die Gefahr von Gaseinschlüssen durch mitgerissene Luft besteht, empfehlen einige der Autoren diese Art als Verfahren der Wahl. FINGER, QUAIST und JUNG ermitteln beim Schleuderguss ein homogenes Gefüge [16].

FUCHS, KUEFMANN, MARX, JORDAN und SCHÖN kamen in experimentellen Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass unter normalen Laborbedingungen beide Gussverfahren als gleichwertig anzusehen sind [44, 19, 39, 58, 34].

KROSZEWSKY erreicht beim Vergießen von Legierungen mit einer Induktionsschmelz- und Vakuumdruckgusskombination deutlich kleinere Korngrößen bei homogenerer Struktur und weniger Lunker, als bei der Verwendung eines Widerstandsschmelzofens in Verbindung mit einem Schleuderguss [38, 37].

In der Studie von DARWISH, MÜLDERS und HOLZE über den Einfluss des Gussverfahrens auf das Gefüge und das Korrosionsverhalten konnte für keines der beiden Attribute eine systematische Abhängigkeit vom verwendeten Gussystem nachgewiesen werden [13].

Beim Schleuderguss ist nach WITTER zu beachten, dass die für das vollständige Ausfließen verantwortliche Fliehkraft nicht zu hoch gewählt werden darf, da es hierbei zu Oberflächenrauigkeiten kommen kann. Deshalb sollte man Gusschleudern nur mit einem regelbaren Drehmoment verwenden. Dennoch empfiehlt er Vakuum-Druckgussanlagen, da diese nach seiner Meinung immer noch feiner dosierbar sind. Als Grund dafür sieht er den Umstand, dass der Druck auf die Oberfläche des Gusskegels unabhängig von der Gussobjektgröße und -form nahezu konstant gehalten werden kann, da die Form und Oberfläche des Gusskegels durch Sockelformer vorgegeben und somit bei jedem Guss nahezu identisch sein sollte [75].

## 2.2.4 Vorbereitende Arbeiten zum Dentalguss

### 2.2.4.1 Überblick

Der richtigen Auswahl der verwendeten Materialien messen einige Autoren größere Bedeutung zu als der Wahl des Gussystems. HINMAN und KAMINSKI beschreiben den großen Einfluss der verwendeten Einbettmassen, der Vorwärm- und Gusstemperatur [35, 28]. KAMINSKI sieht ferner den Mehrfachguss von Legierungen als Ursache für starke Porositäten im Gussstück [35]. Bei der Untersuchung von Randspalten stellte ARIELY Unterschiede fest, je nachdem, welche Einbettmasse, bzw. welches Anmischverhältnis gewählt wurde [2]. ASGAR hebt nochmals den Einfluss der Einbettmassen auf das Gussergebnis hervor [3].

BELOHLAVEK beschreibt die Wichtigkeit der randständigen Lage des Gussobjektes sowie der mittigen Lage des Gusskanals in der Muffel [10].

### 2.2.4.2 Einbettmassen für den Guss

Man unterscheidet drei Guss-Einbettmasse-Arten voneinander:

- Gipsgebundene Einbettmassen
- Ethylsilikatgebundene Einbettmassen
- Phosphatgebundene Einbettmassen

Gipsgebundene Einbettmassen werden aufgrund ihrer bei 700 °C begrenzten Vorwärmtemperatur nur für den Guss von Goldlegierungen eingesetzt, da es bereits bei 800 °C bis 850 °C zu einer störenden Zersetzung des Gipses kommen kann. Häufig sind Löteinbettmassen ebenfalls gipsgebunden. Sie bestehen aus Siliziumdioxid (Quarz) und/oder Cristobalit, Gipshalbhydrat (Bindemittel) und selten mehr als 2 % Stellmittel (Borsäure, Natriumchlorid, Kaliumchlorid). Zudem ist bei dieser Gruppe von Einbettmassen darauf zu achten, das Wachs möglichst auszutreiben solange die Masse noch feucht ist, da es bei einer unvollständigen Entfernung zu einer Reaktion dessen mit dem Gips kommen kann. Dieses beeinträchtigt die Gussqualität deutlich [77, 45, 23, 70],

Ethylsilikatgebundene Einbettmassen beinhalten ca. 80 % Siliziumdioxidmodifikationen und 20 % Ethylsilikat als Bindemittel. Häufig wird diese Mischung mit 0,5 % Magnesiumoxid ergänzt. Gedacht sind diese Massen für Legierungen auf Kobalt-Chrom-Basis, also für eine Liquidustemperatur von über 1000 °C, wie sie insbesondere für die Modellgusstechnik gebräuchlich sind. Als Nachteil gibt REHBERG die starke Versinterung mit dem Gussmaterial an. Die Wiedergabegenauigkeit wird hierdurch drastisch herabgesetzt [52]. Außerdem sind sie schwierig und zeitraubend zu verarbeiten und werden deshalb heute kaum noch eingesetzt [77, 45, 23].

Phosphatgebundene Einbettmassen sind die am vielseitigsten zu verwendenden Massen, da sie sich sowohl für Güsse bei Temperaturen über 1000 °C, also für Kobalt-Chrom-Legierungen, sowie für niedrigschmelzende Edelmetalllegierungen und auch als Löteinbettmasse eignen. Sie bestehen aus einer Mischung von Siliziumdioxidmodifikationen, Magnesiumoxid und Phosphaten (Bindemittel). Sie werden meist als 2-Phasen-Präparate (Pulver und Flüssigkeit) angeboten. Die lineare feste Schwindung von Goldlegierungen, ca. 1,7 %, als auch die von NEM-Legierungen mit etwa 2,2 %, lässt sich durch phosphatgebundene Einbettmassen, aufgrund der steuerbaren Abbindeexpansion und der reproduzierbaren thermischen Expansion, kompensieren. Zudem gelten diese Massen als widerstandsfest gegenüber Rissen beim Aufheizen, Sinterungsschrumpfungen und Hochtemperatur-Korrosionen. Ein weiterer Vorteil ist in dem leichten Ausbetten und Versäubern des Gussobjektes zu sehen [23].

Zu beachten ist, dass die Abbindereaktion der phosphatgebundenen Einbettmassen durch Gipsreste deutlich verzögert und sogar verhindert werden kann. Gipsreste stören zudem beim Vorwärmen durch deren Zersetzung [50].

Alle drei Arten von Einbettmassen weisen während der Erhärtung Expansion und Kontraktion auf, wobei die Expansion überwiegen sollte, um die Kontraktion der Legierung beim Erstarren auszugleichen.

Man unterscheidet zwei Arten der Expansion, zum einen die Abbindeexpansion und zum anderen die thermische Expansion. Die abschließende, bei der Abkühlung auftretende Kontraktion nennt man thermische Kontraktion.

Die Abbindeexpansion tritt bereits nach 3-4 min auf und ist bedingt durch das Ausdehnen des Bindemittels beim Abbinden. Sie hängt von der Zusammensetzung der Massen, vom Pulver/Flüssigkeitsgemisch, Temperatur, Rührzeit und von der Rührintensität ab. Besonders bei phosphatgebundenen Einbettmassen ist die Abbindeexpansion bei höheren Temperaturen deutlich verringert. Ein adäquates Muffelmaterial sollte deshalb die Reaktionswärme ableiten können. Ethylsilikatgebundene Einbettmassen weisen keine Abbindeexpansion auf.

Die thermische Expansion kommt durch die Ausdehnung der feuerfesten Bestandteile zustande. Sie hängt zum größten Teil von der Zusammensetzung der Massen und von der Korngröße ab. Diese bestimmen sowohl den Zeitpunkt, als auch den Umfang der Expansion. Eine kleinere Korngröße bedingt eine größere thermische Expansion. Bei nichtgipsgebundenen Massen ist diese deutlich ausgeprägter, da der Gips nur bis etwa 250 °C expandiert. Das ungehinderte Expandieren gewährleistet das Verändern der Muffeleinlage, bzw. das Entfernen der Kunststoff-Muffel [18].

### **2.2.4.3 Verarbeitung**

Bei der Verwendung von Einbettmassen ist auf ein korrektes Flüssigkeit/Pulver-Gemisch zu achten, da dieses deutliche Einflüsse auf die Festigkeit und Expansion hat. Beide werden durch einen zu hohen Wasseranteil vermindert, jedoch steigt hierbei die Porosität (Permeabilität). Durch das Anmischen unter Vakuum erhält man eine deutlich dichtere Masse. Hierbei ist dann allerdings auf ausreichend Entlüftungswege zu achten, damit die in der Einbettmasse befindliche Luft oder das entsprechend verwendete Gas (zumeist Argon) problemlos entweichen kann und somit Lunker vermieden werden. SHIGEMURA empfiehlt diesbezüglich das Anbringen eines oder mehrerer Entlüftungskanäle [61].

Das korrekte Positionieren des Gussobjektes ist ebenfalls wichtig, um einer Lunkerbildung vorzubeugen. Es sollten gewisse Mindestabstände zu den Muffelwänden sowie dem Muffelboden eingehalten werden, da bei zu naher Lage am Rand die Wärme nicht optimal abfließen und es somit zu einer vermehrten Ausbildung von Porositäten in Richtung der Muffelwandung kommen kann [70].

Das Anbringen eines „verlorenen Kopfes“ als Metallreservoir im Zentrum der Muffel kann ebenfalls das Entstehen von Lunkern im Gussobjekt verhindern [67].

### **2.2.4.4 Ausschmelzen des Waches**

Bei etwa 300 °C für ca. 45 min wird die abgebundene Muffel in einen Ausschmelzofen gestellt. Hierbei sollte das komplette Wachs ausgetrieben werden. Es ist darauf zu achten, dass die Einbettmasse nicht zu trocken ist, da es sonst zum Eindringen von Wachs in diese und damit zu Gussungenauigkeiten kommen kann.

### **2.2.4.5 Vorwärmen**

Das Vorwärmen dient dazu, das Metall beim Guss solange flüssig zu halten, bis die Hohlform vollständig ausgeflossen ist. Zudem wird dem Reißen der Einbettmasse durch das heiße Metall vorgebeugt. Die Vorwärmtemperatur sollte etwa 250-300 °C unter dem Soliduspunkt der Legierung liegen.

Es ist auf ein langsames Vorwärmen zu achten. Deshalb bietet sich ein Etappenverfahren an, bei dem die Temperatur alle 30 min kontinuierlich gesteigert wird. Bei zu schnell ansteigenden Vorwärmtemperaturen vergrößert sich der Gusshohlraum zu sehr und das gegossene Objekt wird zu voluminös sein. Gegenteiliges passiert bei zu niedrigen Vorwärmtemperaturen [32].

## 2.2.5 Quantitative Prüfverfahren des Ausfließverhaltens

### 2.2.5.1 Übersicht

Aufgrund der verschiedensten Guss- und Schmelzverfahren fällt es schwer die ganzen Komponenten und die daraus resultierenden möglichen Kombination zu vergleichen und auf ihre Anwendungsmöglichkeiten in der Zahnmedizin zu testen.

Darum war das Bestreben nach einer reproduzierbaren und einheitlichen Vergleichsmöglichkeit groß.

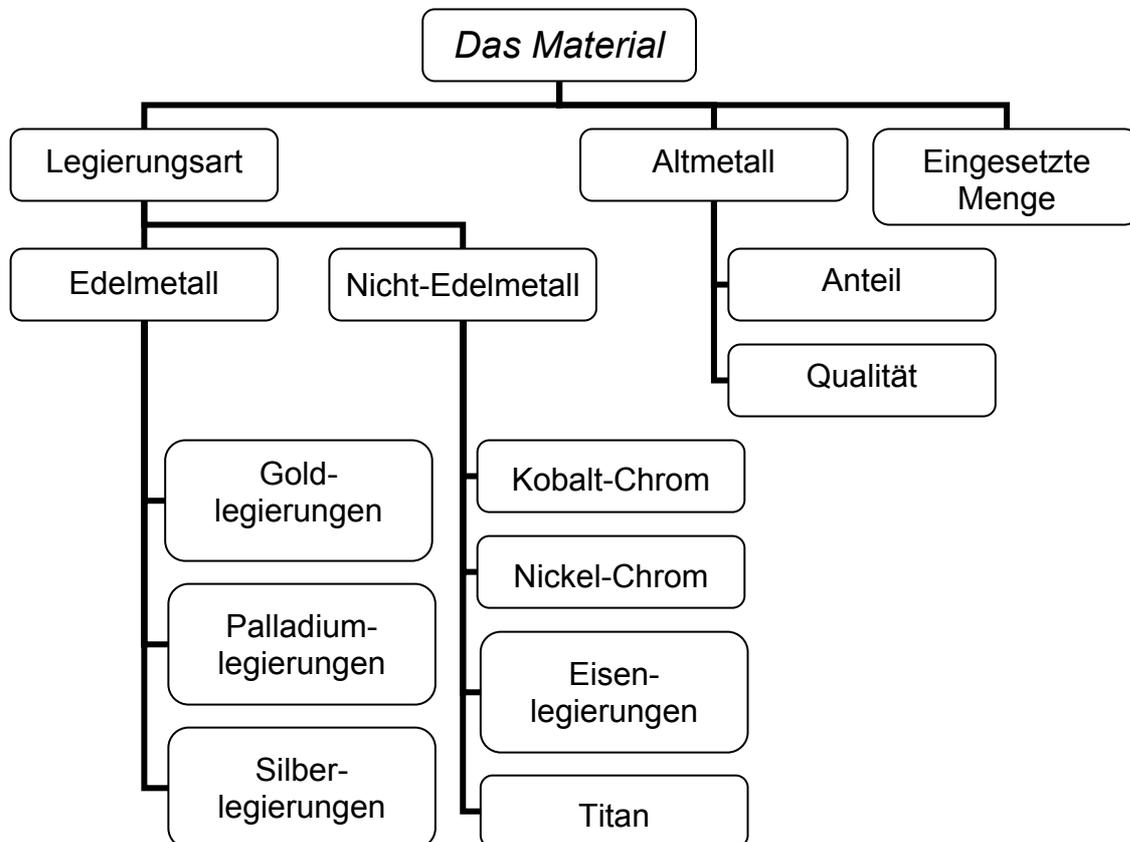
Für ein besseres Verständnis stellen die folgenden Flussdiagramme eine übersichtliche Zusammenfassung der bedeutsamsten Einflussmöglichkeiten dar.



Flussdiagramm 1: Ausfließverhalten

Das Material, das Einbetten, der Guss, sowie die Geometrie des Objektes stellen die wohl wichtigsten Einflussfaktoren auf das Ausfließverhalten dar. Da natürlich auch diese wiederum durch Faktoren manipulierbar sind und eine sorgfältige und genaue Darbietung dieser Einflüsse innerhalb eines Diagramms aus Platzmangel kaum möglich ist, werden diese vier Hauptpunkte anhand vier weiterer Diagramme ausgeführt.

### 2.2.5.1.1 Einfluss: das Material



Flussdiagramm 2: das Material

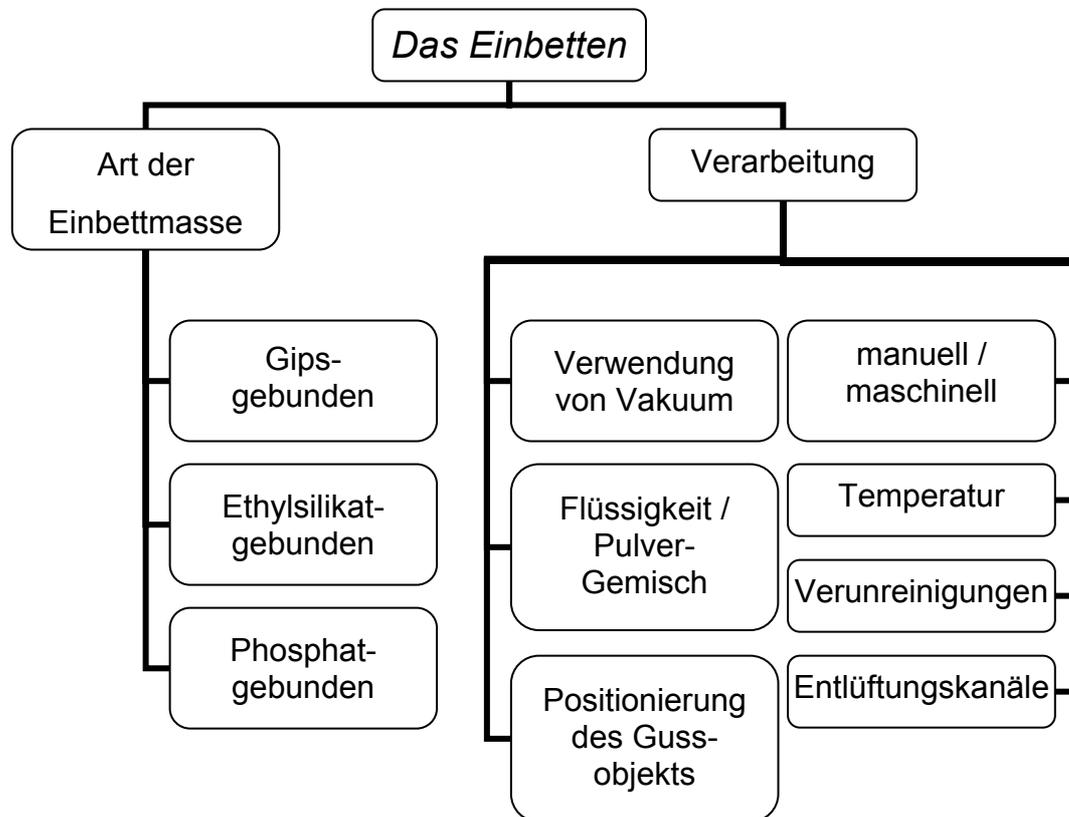
Die Eigenschaften und Anwendungsgebiete der edelmetallfreien Legierungen wurden bereits unter 2.1 näher erläutert. Hier sind aus Gründen der Vollständigkeit ebenfalls die Edelmetalllegierungen mit aufgeführt.

Der bedeutende Einfluss des Materials ist wohl unbestritten. Hierbei ist die Reinheit, bzw. Qualität der Legierung, sowie deren Menge, von besonderer Bedeutung. Handelt es sich etwa um Material, das wiedervergossen werden soll, so ist das Gussergebnis deutlich anders zu werten, als wenn es sich um unverbrauchte Chargen handelt. Die Ursache hierfür kann durch die Einlagerung von Verunreinigungen, wie etwa Kohlenstoff oder Einbettmassereste erklärt werden. Bei jedem erneuten Wiedervergießen steigt die Gefahr von lunkrigen Güssen und ungenügender Ausbildung des Legierungsgefüges. Das tückische an diesem Vorgang ist sein schleicher, meist für den Zahntechniker gar nicht bemerkbarer, Verlauf [66]. Durch die Vermischung des bereits vergossenen Materials mit frischen Chargen kann man die Auswirkungen der Verunreinigungen mildern.

Andere Behandlungsschritte führen häufig zu weit stärkeren Veränderungen des Gussgefüges als das Wiedervergießen (STRIETZEL). Überhitzen, ungünstige Tiegelwahl, sowie die falsche Einbettmasse beeinflussen das Resultat wesentlich nachhaltiger [66].

Um einen zufrieden stellenden Guss durchzuführen, ist auch die Abstimmung auf die verwendete Legierung sehr wichtig. So gelten bei Edelmetallen andere Bedingungen als bei Nicht-Edelmetallen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Art der Einbettmasse und das Schmelzverfahren, bzw. die hierbei verwendete Temperatur. Besonders bei Edelmetallen muss auf das Vermeiden einer ungünstigen Überhitzung geachtet werden.

### 2.2.5.1.2 Einfluss: das Einbetten



Flussdiagramm 3: das Einbetten

Wie bereits erwähnt, spielt die Art der Einbettmasse eine entscheidende Rolle (Kapitel 2.2.4.2). Diese ist ganz spezifisch auf die verwendete Legierung anzuwenden. Die Legierung, sowie Einbettmasse bedingen die benötigte Gusstemperatur.

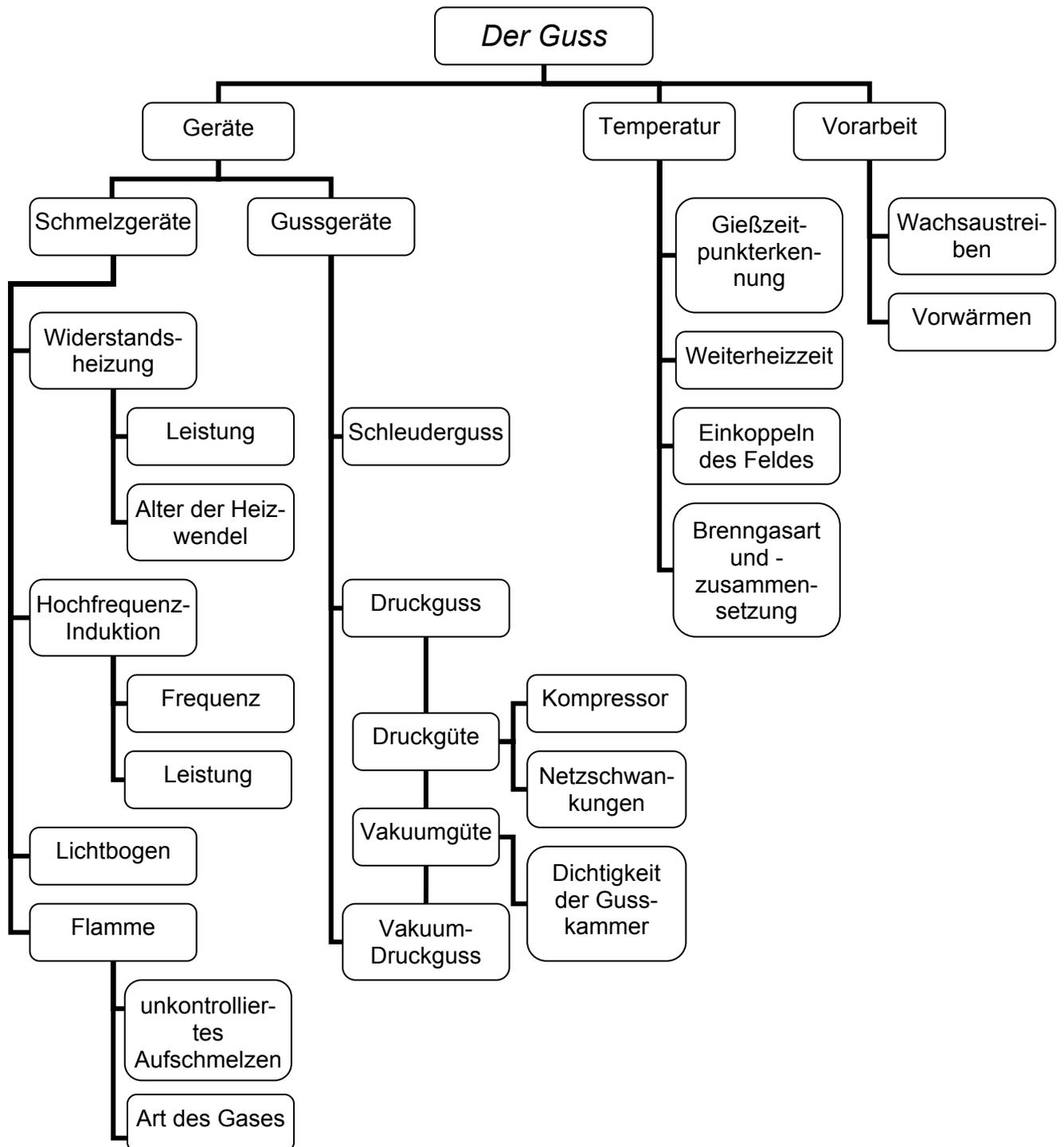
Ebenfalls wichtig ist die Verarbeitung, denn durch die Anwendung von Vakuum ist eine deutliche Reduzierung von Lufteinschlüssen, welche das Gussresultat verschlechtern, während des Einbettvorgangs möglich.

Nur durch das Verwenden des korrekten Flüssigkeit / Pulver Gemischs stimmen die Werte der Dimensionsveränderungen des Metalls und der Einbettmasse überein, und das letztendlich gewonnene Gussobjekt unterliegt keinen Fehlproportionen. Unterschiede können zusätzlich durch maschinelles oder manuelles Verarbeiten der Einbettmasse auftreten. Auch Verunreinigungen, eventuell durch Gipsreste, haben einen entscheidenden Einfluss auf den Abbindevorgang [50].

Die Position des zu gießenden Objekts beeinflusst im erheblichen Maße die Ausbildung von Lunkern. Es ist darauf zu achten, dass ein „Nachziehen“ von noch flüssiger Legierung während des Erstarrungsvorgangs nicht zu Fehlstellen (Lunkern) im Objekt führt und dass das sich im Gushohlraum befindliche Gas gut entweichen kann. Wie bereits unter Abschnitt 2.2.4.3 erwähnt kann das Anbringen eines Metallreservoirs oder eines Entlüftungskanals sinnvoll sein [61].

Ebenfalls sollte die Lagebeziehung des Objektes zum Muffelrand oder -boden überprüft werden. Ist diese zu eng könnte eine vermehrte Ausbildung von Porositäten die Folge sein [70].

### 2.2.5.1.3 Einfluss: der Guss



Flussdiagramm 4: der Guss

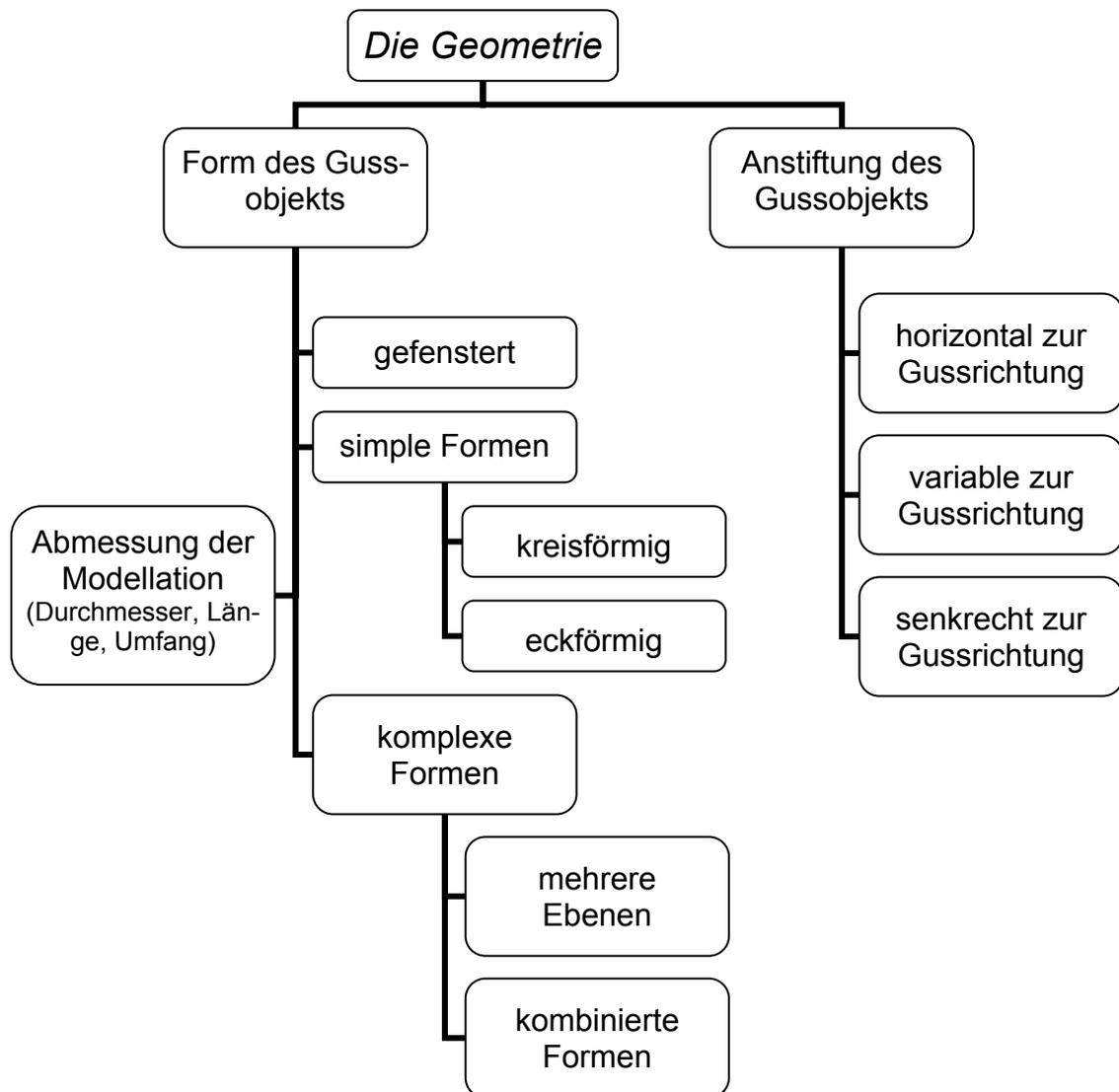
Bezüglich der Kapitel 2.2.2 (Schmelzverfahren) und 2.2.3 (Gussverfahren) kann man anhand des Diagramms gut erkennen, wie vielschichtig die Einflüsse auf den Gussvorgang sind. Hierdurch ist gut nachvollziehbar, wie die unterschiedlichen Ergebnisse und Meinungen der unter 2.2.2 und 2.2.3 aufgeführten Quellen zustande kommen.

Zum einen spielen hierbei die verwendeten Geräte eine entscheidende Rolle. Sowohl die Schmelz-, als auch die Gussgeräte sollten zueinander, sowie auch auf die verwendete Legierung und Einbettmasse abgestimmt sein. Bei diesen aufwendigen Apparaturen ist eine stetige Kontrolle der Funktionsfähigkeit durchzuführen. So muss man bei Vakuum-Druckguss-Geräten beachten, dass sowohl der Druck, als auch das Vakuum korrekt erzeugt und auch gehalten werden können. Ähnliches gilt für die Schmelzgeräte die mit Hochfrequenz und Induktion arbeiten. Bei verminderter Leistung oder ungenügender Frequenz arbeitet das Produkt nicht optimal. Leistung und Zustand der Heizwendel sind beim Schmelzen mit Widerstandsheizung essentiell für einen erfolgreichen Guss.

Von großer Bedeutung ist auch die beim Guss verwendete Temperatur. Wie ebenfalls schon unter 2.2.2 erwähnt, hat diese eine erhebliche Auswirkungen auf das Resultat. Hierbei können die im Flussdiagramm 4 aufgeführten Faktoren entscheidend zum Gussergebnis beitragen. So sollte man durch eine Gießzeitpunkterkennung, eine beeinflussbare Weiterheizzeit und eine justierbare Feldeinkoppelung die Temperatureinwirkung regulieren oder zumindest auf den gewünschten Gießvorgang abstimmen können. Durch Wahl des zu verwendeten Brenngases ist eine zusätzliche Einflussnahme möglich.

Eine adäquate Vorarbeit durch einwandfreies Wachsaustreiben und Vorwärmen sollten ebenfalls bei der Begutachtung der Gussqualität beachtet werden. Kann es hierbei doch schnell zu Verunreinigungen oder zu mangelnden Ausfließen der Legierung kommen.

#### 2.2.5.1.4 Einfluss: die Geometrie des Gussobjektes



Flussdiagramm 5: die Geometrie

Der Einfluss der Geometrie des Gussobjektes auf das Resultat ist sehr groß, da es eine immense Vielfalt an unterschiedlichen Formen und Anstiftvariationen gibt. Genau hier liegt auch der Ansatzpunkt für die Entwicklung des MBS-Systems (Kapitel 2.2.5.2) und für die Konstruktion eines neuen Prüfsystems, da die Geometrie des Gussobjektes gut und einfach zu verändern und auf gewisse Anforderungen hin zu gestalten ist.

### 2.2.5.1.5 Einflüsse: Schlussfolgerung

Wie das Studium der Literatur ergab, gibt es eine Vielzahl von Einflüssen (2.2.5.1 – 2.2.5.1.4), die sich mehr oder weniger günstig auf das Gussergebnis auswirken können. Nur mit Hilfe von qualitativen und quantitativen Prüfverfahren kann man die unterschiedlichsten Guss-Konfigurationen miteinander vergleichen, um dann gültige Aussagen über Pro und Kontra der einzelnen Methoden zu treffen.

Hierfür ist es erforderlich Prüfsystems zu verwenden, die reproduzierbare Resultate hervorbringen. Man kann dann durch Variation einer Komponente (z. B. Gussmaschine, Legierung, Einbettmasse) und gleichzeitiger Konstanz der anderen, Ergebnisse erzielen, die vergleichende Aussagen zulassen bezüglich der variierten Komponente.

Da es sich bei dieser Dissertation um die Entwicklung eines Prüfkörpers zur Quantifizierung handeln soll, entfällt die Besprechung qualitativer Werkstoff-Prüfverfahren (Härte, E-Modul, Röntgenstrukturanalyse usw.). Der Prüfkörper dient „lediglich“ der Messung wie viel, bzw. bis wohin, die Legierung geflossen ist. Dennoch sind zur vollständigen Abklärung der Tauglichkeit der Resultate zusätzlich qualitative Tests anzuraten.

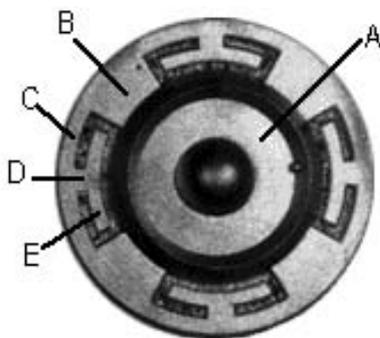
Folgende Anforderungen sollte ein Prüfkörper erfüllen:

- relativ einfach in der Herstellung, um einen immer gleichwertigen und gleichproportionierten Prüfkörper zu erhalten und um damit mögliche Messfehler zu minimieren
- Der Prüfkörper muss reproduzierbare Ergebnisse liefern (d.h. geringe Standardabweichungen und Variation)
- Es muss möglich sein eine Bewertung (z.B. in Form von Prozent) über das Ausfließverhalten anzugeben
- Die erreichten Werte sollten nie 100 %, aber auch niemals 0 % sein. Dieses dient der Gewährleistung der genauen Messung; optimalerweise sollte der Prüfkörper zu 50 % ausgefüllt werden

Das bereits etablierte MBS-Modell zur Prüfung der Quantität beim Gießen soll hier nun anschließend vorgestellt und theoretisch begutachtet werden.

### 2.2.5.2 MBS – Test

Im Jahre 1977 entwickelten ASGAR und ARFAEI ein Modell für die Schätzung der Vergießbarkeit von Dentallegierungen und der Schmelztechnik [3]. Da dieses System aber besonders bei Nickel-Chrom-Legierungen nicht besonders Erfolg versprechend war, erforschten MEYER, BARRAUD und SUSZ an der Universität in Genf 1983 das neue Modell MBS („M“eyer, „B“arraud, „S“usz). Dieses basiert zwar auf dem Modell von ASGAR und ARFAEI bietet aber aufgrund von Bohrungen der Außenseite eine bessere Metallausbreitung und zuverlässigere Parameter [46, 43, 41, 69, 68].



Mit dieser Methode ist es möglich für jede Dentallegierung die optimalen Schmelz- und Verarbeitungsbedingungen zu bestimmen und daraufhin die Laborverarbeitung anzupassen.

Das Modell besteht aus einer Scheibe mit dünnen und dicken Anteilen, ergänzt durch die Bohrungen der Außenseite. Durch die schwer auszugießenden Seitenflügel ist eine Klassifizierung in 25 Zonen möglich. Das geschmolzene Metall füllt erstrangig die Zentralzone (1x Zone A), erweitert sich in die dünnen Zonen (4x Zone B), erreicht die äußeren Scheibenzonen (8x Zone C) und schließlich die Seitenflügel (4x Zone D und 8x Zone E) [68].

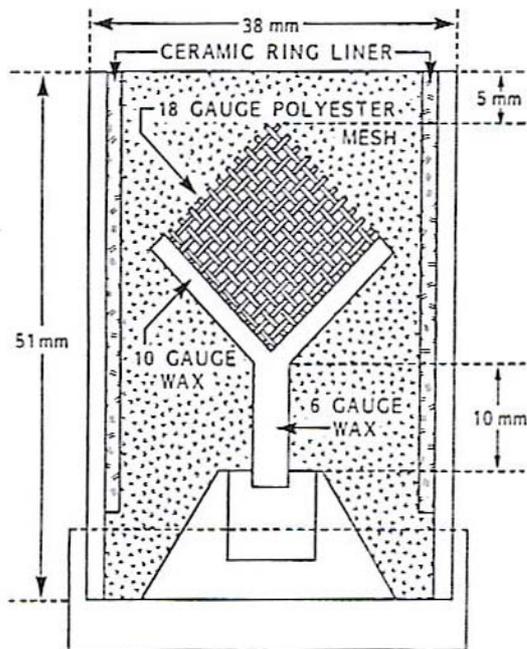
Durch die 4-fache Multiplikation der ausgeflossenen Zonen erhält man den spezifischen Schmelzindex IC in Prozent [68].

Als Vorteil dieses Verfahren ist das einfache und schnelle Anwenden zu nennen. Die Ermittlung des ICs kann entweder selber oder durch spezielle Labore durchgeführt werden. Zudem ist es für nahezu jede Legierung, sowie für beinahe jedes dentale Guss- und Schmelzverfahren anwendbar [42]. Demgemäß führte KLINGER [15] eine Studie zur Quantifizierung des Fließvermögens von Titan mit Hilfe des MBS-Systems durch.

SUSZ, MEYER, BARRAUD, LÜTHY führten mit dem von ihnen entwickeltem MBS-System mehrere Versuchsreihen durch. Im Rahmen dieser Untersuchungen testeten sie 19 Legierungen (EM und NEM), sowie sechs verschiedene Schmelz/Gussskombinationen. Die Ergebnisse bescheinigten dem Prüfverfahren eine taugliche Aussagekraft und einfache Anwendbarkeit [68].

### 2.2.5.3 Whitlock Test

WHITLOCK, HINMAN, TESK, PARRY und DURKOWSKI entwarfen ebenfalls ein Prüfsystem zur Erfassung des Ausfließverhaltens von zahnärztlichen Legierungen. Ihr konstruierter Prüfkörper orientierte sich jedoch nicht an ASGAR und ARFAEI, stattdessen basierte er auf den Untersuchungen von VINCENT [72].



Als Grundform wird ein Quadrat aus einem industriell hergestellten Netz bestehend aus Polyestersträngen verwendet. Die Stränge selbst haben einen Durchmesser von 18 Gauge (etwa 1,1 mm). Dieses Präparat lässt sich Einbetten und Austreiben.

Das Rechteck wird an einer Ecke senkrecht mit 6 Gauge (etwa 4,11 mm) Rundwachs mit 10 mm Länge angestiftet, während sich zusätzlich an den beiden angrenzenden Seiten 10 Gauge (etwa 2,59 mm) Rundwachs befindet [48, 74].

Das vorliegende Raster besteht aus 100 Kästchen (10 x 10) und 220 Segmenten. Um das erhaltene Gussresultat in einen numerischen Wert zur Beschreibung des Ausfließverhaltens zu überführen, zählt man sämtliche ausgeflossene Segmente

zusammen, teilt diesen Wert durch 220 und abschließend erhält man durch die Multiplikation mit 100 einen Prozentwert, der bei diesem System als „castability value“ (CV) definiert wurde [74].

Anhand dieses Systems wurden 18 Legierungen untersucht. Bei der Betrachtung und Auswertung der Endergebnisse zeigte sich, dass eindeutige Aussagen über die entsprechenden Legierungen bezüglich ihres Fließverhaltens nicht möglich sind, da bereits kleinste Variationen oder Ungenauigkeiten eine erhebliche Verzerrung des Resultates zur Folge haben. Insofern sollten die Ergebnisse eher als mögliche Tendenzen zu interpretieren [74].

Für seine Arbeit über den Einfluss der Temperatur auf das Gießen von Kobalt-Chrom-Legierungen konnte HERØ, unter Verwendung des Prüfsystems basierend auf WHITLOCK et al. zur Messung der Quantität, erfolgreich den deutlichen Einfluss der Temperatur auf das Ausfließverhalten darstellen [27].