

Aus der Abteilung für Experimentelle Zahnheilkunde der  
Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Einfluss von  
Vorwärm- und Gießtemperaturen auf das  
Ausfließverhalten von EMF – Legierungen**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von  
Zahnärztin Olivia Schallmayer  
aus Berlin

Gutachter: 1. Priv.-Doz. Dr. R. Strietzel

2. Prof. Dr. J. M. Setz

3. Prof. Dr. med. dent. K. Böning

Datum der Promotion: 22. März 2013

## Erklärung

„Ich, Olivia Schallmayer, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: Einfluss von Vorwärm- und Gießtemperaturen auf das Ausfließverhalten von EMF – Legierungen selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Olivia Schallmayer

---

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b> .....	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Literaturübersicht</b> .....	<b>11</b>
<b>3.1</b>	<b>Grundlagen Dentallegierungen</b> .....	<b>11</b>
3.1.1	Definition Legierung .....	11
3.1.2	Einteilung der Dentallegierungen .....	11
3.1.2.1	Legierungen auf der Basis von Nichtedel – Metallen .....	14
3.1.3	Schmelz- und Erstarrungsverhalten von Dentallegierungen .....	15
3.1.4	Schmelz- und Gussverfahren .....	17
3.1.5	Medizinproduktegesetz und Anforderungen an Dentallegierungen .....	20
<b>3.2</b>	<b>Prüfverfahren zur Quantifizierung des Ausfließverhaltens von Legierungen</b> .....	<b>21</b>
3.2.1	Definition Vergießbarkeit .....	21
3.2.2	Einflussnehmende Größen auf die Formfüllung .....	23
3.2.2.1	Prüfkörpergestalt .....	24
3.2.2.2	Materialspezifische Eigenschaften .....	26
3.2.2.3	Verarbeitung .....	29
3.2.3	Anforderungen an Testverfahren .....	37
3.2.4	Prüfkörperformen zur Messung der Vergießbarkeit von Legierungen .....	37
3.2.5	Vergleich der Prüfkörper – Testverfahren .....	49

---

<b>4</b>	<b>Material und Methode</b> .....	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Verwendete Materialien</b> .....	<b>51</b>
4.1.1	EMF – Legierungen .....	51
4.1.1.1	Modellgusslegierungen (Wironit, Wironit LA, Wironium Plus).....	51
4.1.1.2	EMF – Aufbrennlegierungen (Wirobond C, Wirobond LFC, Wiron 99) .....	53
4.1.2	Verwendete Einbettmassen .....	55
4.1.3	Wachs.....	55
<b>4.2</b>	<b>Geräte</b> .....	<b>56</b>
4.2.1	Nautilus CC.....	56
4.2.2	Zusätzliche Geräte.....	56
<b>4.3</b>	<b>Methode</b> .....	<b>57</b>
4.3.1	Prüfkörperherstellung.....	57
4.3.2	Versuchsdurchführung.....	61
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>63</b>
<b>5.1</b>	<b>Allgemeines</b> .....	<b>63</b>
<b>5.2</b>	<b>Ergebnisse des Ausfließverhaltens der Modellgusslegierungen</b> .....	<b>65</b>
5.2.1	Ergebnisse der Wironit – Serie .....	65
5.2.2	Ergebnisse der Wironit LA – Serie .....	68
5.2.3	Ergebnisse der Wironium Plus – Serie .....	71
5.2.4	Vergleich der Ergebnisse des Ausfließverhaltens der Modellgusslegierungen .....	73

---

<b>5.3</b>	<b>Ergebnisse des Ausfließverhaltens der EMF – Aufbrennlegierungen</b> .....	74
5.3.1	Ergebnisse der Wirobond C – Serie.....	74
5.3.2	Ergebnisse der Wirobond LFC – Serie .....	77
5.3.3	Ergebnisse der Wiron 99 – Serie .....	80
5.3.4	Vergleich der Ergebnisse des Ausfließverhaltens der EMF – Aufbrennlegierungen .....	82
<b>5.4</b>	<b>Vergleich der Ergebnisse des Ausfließverhaltens der Modellgusslegierungen mit den der EMF – Aufbrennlegierungen</b> .....	83
5.4.1	Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur .....	83
5.4.2	Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der Gießtemperatur.....	85
<b>5.5</b>	<b>Fazit</b> .....	87
<b>6</b>	<b>Diskussion</b> .....	88
<b>6.1</b>	<b>Fehlerbetrachtung</b> .....	88
6.1.1	Prüfkörperherstellung.....	88
6.1.2	Auswertung der Prüfkörper .....	90
6.1.3	Eignung des Ausfließtests .....	90
<b>6.2</b>	<b>Diskussion der Versuchsergebnisse</b> .....	91
6.2.1	Vergleich der Modellgusslegierungen und der EMF – Aufbrennlegierungen .....	91
6.2.1.1	Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur .....	91
6.2.1.2	Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der Gießtemperatur.....	92
6.2.1.3	Abschließende Betrachtung .....	97

---

6.3	<b>Klinische Bedeutung des Ausfließtests</b> .....	97
7	<b>Zusammenfassung</b> .....	99
7.1	<b>Summary</b> .....	101
8	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	103
9	<b>Anhang</b> .....	116
9.1	<b>Ergebnisse der Ausfließtests der Modellgusslegierungen</b> .....	116
9.1.1	Versuchsergebnisse der Wironit – Serie .....	116
9.1.2	Versuchsergebnisse der Wironit LA – Serie .....	121
9.1.3	Versuchsergebnisse der Wironium Plus – Serie .....	126
9.2	<b>Ergebnisse der Ausfließtests der EMF – Aufbrennlegierungen</b> .....	131
9.2.1	Versuchsergebnisse der Wirobond C – Serie .....	131
9.2.2	Versuchsergebnisse der Wirobond LFC – Serie... ..	136
9.2.3	Versuchsergebnisse der Wiron 99 – Serie.....	141
	<b>Danksagung</b> .....	146
	<b>Lebenslauf</b> .....	147

## 1 Einleitung

In Zeiten der globalen Wirtschaftskrise und des GKV – Modernisierungsgesetzes (Gesetzliche Krankenversicherung) von 2004 ist die Kostendämpfung im Gesundheitssektor obligat. Die steigende Nachfrage nach Edelmetallen (Dental – Hochgoldlegierung ca. 40,00 bis 50,00 Euro pro Gramm, Stand Januar 2012) lässt die Preise dafür sehr stark ansteigen, was den Zahnarzt und Zahntechniker nach kostenreduzierenden Maßnahmen suchen lässt. In der Zahntechnik nimmt somit die Kostensenkung bei der Herstellung von dentalem Präzisionsguss eine entscheidende Stellung ein. Die Verwendung von EMF – Legierungen (edelmetallfreie Legierungen) und deren Weiterentwicklung ist somit von entscheidender Bedeutung.

Der Werkstoff, aus dem das Gussstück hergestellt werden soll, ist der entscheidende Faktor für die Realisierung von Zahnersatz, denn der Werkstoff bestimmt letztendlich wie grazil das Gussobjekt aus konstruktiver und fertigungstechnischer Sicht minimal sein darf. Durch hohe Festigkeitswerte und durch den höheren Elastizitätsmodul der EMF – Legierungen können Strukturen wie sie beispielsweise in der Kombinationsprothetik vorkommen (Passung von Primär- und Sekundärteleskop) sehr viel dünner und graziler gestaltet werden als beim Einsatz von Edelmetalllegierungen. Hohe Anforderungen an die dentale Konstruktion und Fertigung hinsichtlich Maßhaltigkeit und Steifigkeit sind essentiell für die Herstellung umfangreichen Zahnersatzes.

Die Qualität eines dentalen Präzisionsgussstückes wird wesentlich durch die Art des Gießverfahrens, der Legierungszusammensetzung und die sich daraus ergebenden gießtechnologischen Eigenschaften wie das Fließvermögen und Formfüllungsvermögen bestimmt. Der Gießprozess der EMF – Legierungen ist sehr störanfällig. Eine Überhitzung der Schmelze führt durch Reaktionen oxidationsfreudiger Legierungsbestandteile (z. B. Mangan, Silizium) zu einer nicht steuerbaren Veränderung in der Legierungszusammensetzung, was deren mechanische Eigenschaften negativ beeinflusst [37].

Die Bestrebung liegt in der Herstellung von dentalen Präzisionsgüssen mit einem feinkörnigen, homogenen, lunker- und porositätenfreien Gefügebild, wodurch günstige mechanische Eigenschaften wie eine höhere Festigkeit und Härte und eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit erzielt werden. Ein grobkörniges, inhomogenes Gefüge führt zu einer Versprödung des Materials mit einhergehender erhöhter Bruchgefahr und einer Verringerung der mechanischen Eigenschaften. Auch besteht die Gefahr der Lokalelementbildung [47].

Neben Änderungen der chemischen oder mechanischen Eigenschaften gilt das Formfüllungsvermögen als eine sehr wichtige spezifische Gießeigenschaft, das die Fähigkeit einer Legierung beschreibt den Formhohlraum formgetreu wiederzugeben [23, 42]. Damit ist das Formfüllungsvermögen ein wesentliches Beurteilungskriterium für den Zahntechniker.

So stellt sich die Frage, ob sich die Vergießbarkeit von edelmetallfreien – Legierungen durch Veränderungen im Gießprozess optimieren lässt.

## 2 Aufgabenstellung

In der vorliegenden Arbeit soll anhand von sechs edelmetallfreien – Legierungen, davon drei nicht aufbrennfähige EMF – Legierungen für die Modellgusstechnik und drei aufbrennfähige EMF – Legierungen für die Verblendung von Kronen- und Brückengerüsten der Firma BEGO (Bremen, Deutschland) untersucht werden, inwieweit sich die Formfüllung dieser sechs Legierungen durch Variation von Vorwärmtemperatur sowie Gießtemperatur beeinflussen lässt. Dabei kommt ein neu entwickelter Prüfkörper (modifiziertes Wachsretentionsgitter) zur Anwendung [40], mit dem das Ausfließverhalten von Dentallegierungen unter veränderten Temperaturbedingungen quantitativ erfasst werden kann. Es werden Güsse hergestellt, wobei zum einen die Muffeln zu kalt und zu heiß vorgewärmt werden und zum anderen zu niedrige und zu hohe Schmelztemperaturen gewählt werden. Die erzielten Versuchsergebnisse werden mit Güssen, die gemäß Herstellerangaben verarbeitet werden, quantitativ verglichen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zu untersuchen, ob die gewählte Versuchsanordnung geeignet ist, das Ausfließverhalten von verschiedenen EMF – Legierungen objektiv zu beurteilen.

### **3 Literaturübersicht**

#### **3.1 Grundlagen Dentallegierungen**

##### **3.1.1 Definition Legierung**

Das Verb legieren stammt ursprünglich aus dem lateinischen *ligare* und bedeutet zusammenbinden, verbinden oder auch vereinigen. Im 17. Jahrhundert wurde das inzwischen leicht abgewandelte *legare* (von gleicher Bedeutung) ins Deutsche übernommen [51]. Im anglo - amerikanischen Sprachraum als „*alloy*“ [24] bezeichnet, versteht man unter einer Legierung ein metallisches Material, das aus einer Mischung von mindestens zwei Metallen oder aus einem Metall und einem Nichtmetall besteht, wobei der metallische Charakter erhalten bleiben muss [47, 106]. Gemische aus Gold und Kupfer sowie aus Eisen und Kohlenstoff zählen zu den ältesten und bekanntesten Legierungen.

Welche Bedeutung hat das Legieren? Reine Metalle kommen im zahnärztlichen Bereich wegen ihrer unzureichenden mechanischen Eigenschaften nur selten zur Anwendung (Zinnfolien in der Totalprothetik, Gold in der Galvanotechnik, Titan in der Implantologie) [68]. Durch das Legieren verschiedenster Metalle können die Metalleigenschaften gezielt verändert werden, um so die physikalischen und chemischen Eigenschaften einer Legierung zu steigern (erhöhte Korrosions- und Säurefestigkeit, Farbänderung, ein für die Verblendtechnik günstiges thermisches Ausdehnungsverhalten). Das Legieren erlaubte die Entwicklung neuer Legierungstypen, wozu die Aufbrennlegierungen gezählt werden [47].

##### **3.1.2 Einteilung der Dentallegierungen**

Deutschlandweit existieren über 1500 verschiedenste Dentallegierungen mit dem unterschiedlichsten Anwendungsbereich in der Zahnmedizin [25]. Die Dentallegierungen können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden.

Die folgende Abbildung verschafft einen Überblick über die Einteilung der Dentallegierungen nach ihrem Verwendungszweck. Dabei werden überwiegend die zahnmedizinischen Aspekte berücksichtigt [103].

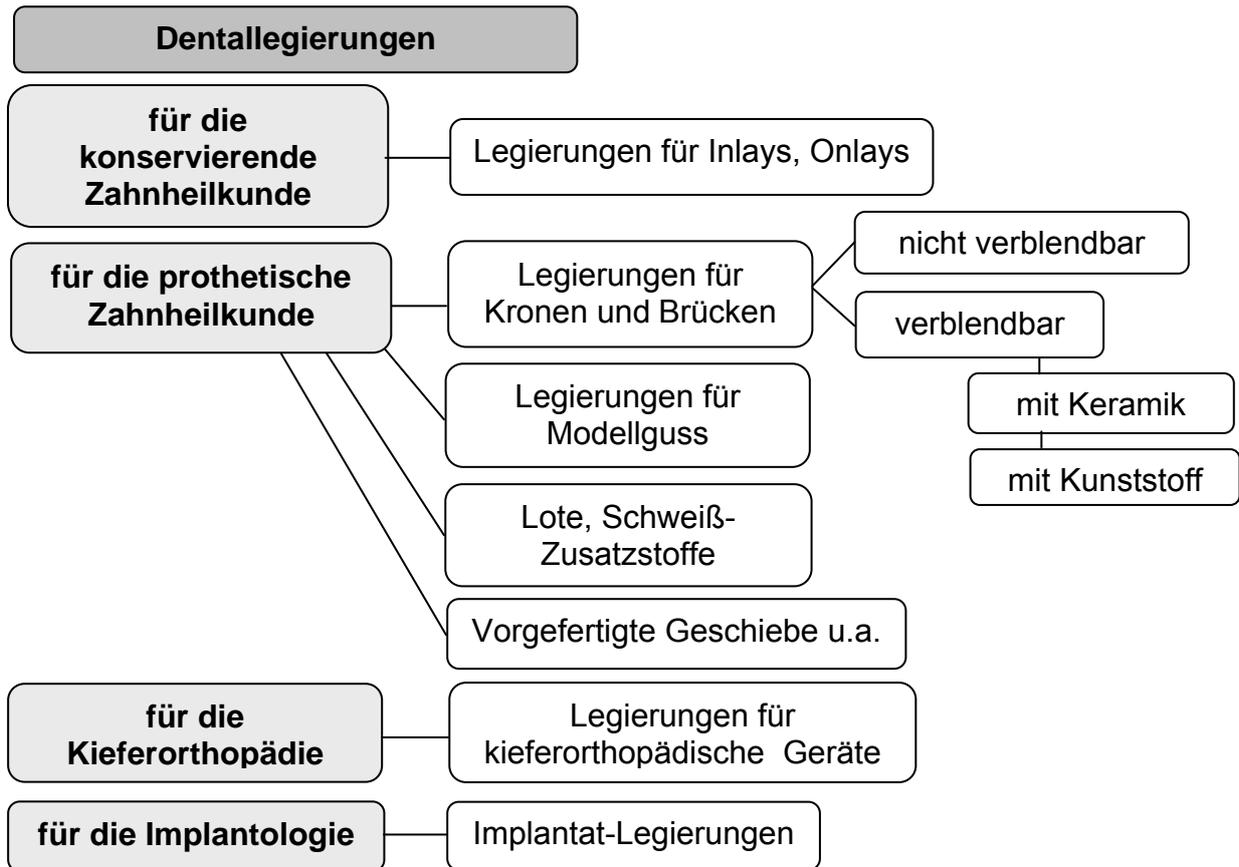


Abb. 3.1: Einteilung der Dentallegierungen nach ihrem Indikationsbereich

EICHNER, KÖRBER, MARXKORS, SIEBERT teilen die Dentallegierungen nach ihrer chemischen Zusammensetzung ein. Dabei werden zwei Hauptgruppen unterschieden, die Edelmetall- und Nichtedelmetall – Legierungen [37, 63, 68, 97, 107].

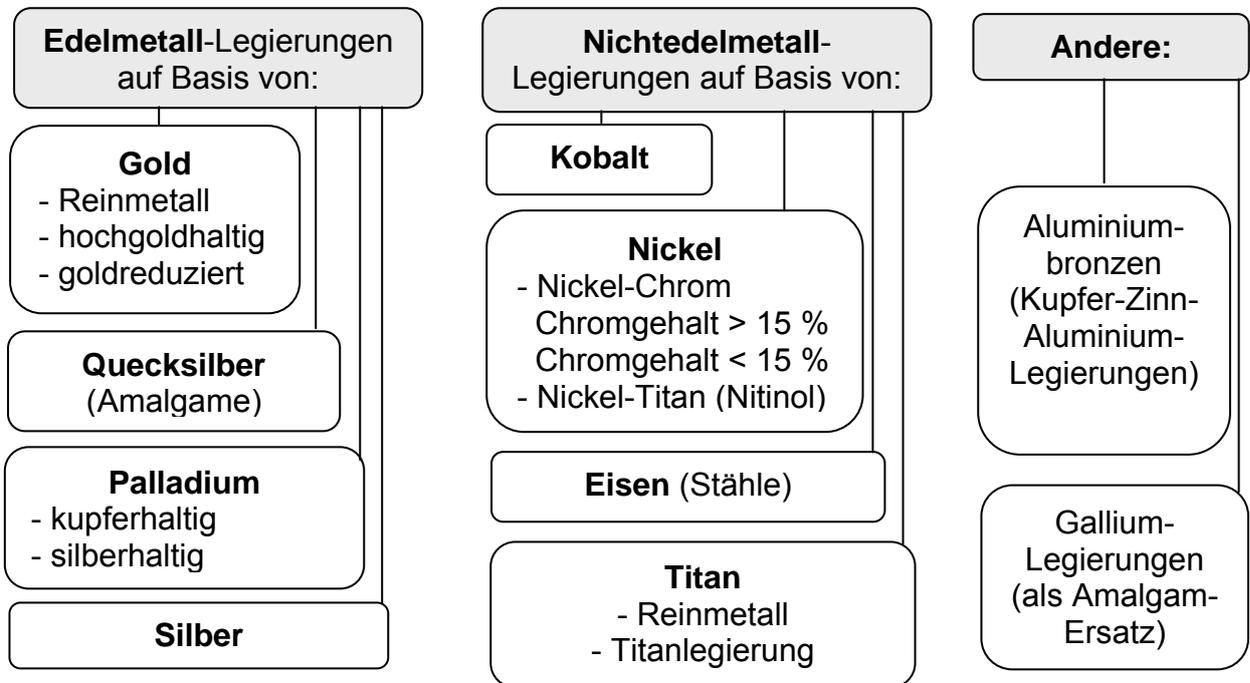


Abb. 3.2: Einteilung der Dentallegierungen nach der chemischen Zusammensetzung

Im anglo – amerikanischen Sprachraum unterteilt man die Dentallegierungen nach ihrer chemischen Zusammensetzung in drei Gruppen [24, 102]:

1. hochgoldhaltige Legierungen → „precious alloys“
2. goldreduzierte, Silber – Palladium – Legierungen → „semi precious alloys“
3. NEM/EMF – Legierungen → „non precious alloys“

### 3.1.2.1 Legierungen auf der Basis von Nichtedel – Metallen

NEM – Legierung steht für Nichtedelmetall – Legierung, was jedoch nicht korrekt ist, da diese Abkürzung nach der DIN 1700 [91] bereits für Nichteisenmetalle vergeben ist. Geringe Mengen an Edelmetallen können in NEM – Legierungen enthalten sein [37]. Sind diese jedoch frei von Edelmetallen spricht man von EMF – Legierungen (edelmetallfreie Legierungen) [91]. Maßgebend für die Bezeichnung einer Legierung ist der Bestandteil mit dem höchsten Massegehalt [37].

Die Einteilung von EMF – Legierungen anhand der chemischen Zusammensetzung wurde bereits unter Kapitel 3.1.2 dargestellt. Innerhalb der einzelnen Gruppen kann je nach der Legierungsbasis weiter differenziert werden, ob eine Legierung nicht aufbrennfähig oder aufbrennfähig ist [21, 37].

Indiziert für die Modellgusstechnik besitzen nicht aufbrennfähige EMF – Legierungen vergleichbare Zugfestigkeitswerte und Dehngrenzen wie Edelmetall – Legierungen. Hervorzuheben ist ihre größere Härte und ein ca. doppelt so hoher Elastizitätsmodul [37]. Abgeleitet von den Modellgusslegierungen entstanden die aufbrennfähigen EMF – Legierungen. Besonderheit der aufbrennfähigen EMF – Legierungen ist der Zusatz von Wolfram aber auch von Mangan, Cer, Lanthan oder Aluminium in geringen Anteilen, welche für die Haftoxidbildung und somit für den Metall – Keramik – Verbund von Bedeutung sind [21]. Die Härte wird maßgeblich durch die Elemente Kohlenstoff und Stickstoff bestimmt sowie durch Kombination verschiedener Elemente (Bsp. Chrom und Kohlenstoff). Dagegen sind Chrom, Molybdän und Niob für die Korrosionsstabilität und höhere mechanische Eigenschaften verantwortlich [37, 20]. Bei Kobalt – Legierungen sollte der Chromgehalt mindestens 27 Gewichtsprozent betragen, um eine ausreichende Korrosionsstabilität zu erreichen [21].

### 3.1.3 Schmelz- und Erstarrungsverhalten von Dentallegierungen

Legierungen differieren in ihrem Schmelz- und Erstarrungsverhalten im Vergleich zu reinen Metallen. Betrachtet man Abkühlungskurven, erkennt man einen verzögerten Temperaturabfall mit zwei Wendepunkten am Anfang und Ende der Kurve. Beide Punkte geben den Bereich an, in dem beim Abkühlen die Schmelze erstarrt bzw. beim Schmelzen sich das Metall verflüssigt. Es gibt keinen Schmelzpunkt, sondern ein Schmelz- bzw. Erstarrungsintervall mit einem Liquiduspunkt (obere Grenze) und einem Soliduspunkt (untere Grenze). Die Kenntnis vom Schmelzverhalten der Metalle und Legierungen ist bei der Verwendung derer von entscheidender Bedeutung.

Die Schmelztemperatur ist abhängig von den Wechselwirkungskräften der Atome untereinander. Je höher die Anziehung, desto höher die Schmelztemperatur. Das bedeutet, dass durch Zulegieren bestimmter Atome der Schmelzvorgang zu höheren Temperaturen verschoben wird, wenn die Anziehungskräfte der Atome untereinander sehr groß sind. Das Schmelzverhalten ist abhängig von der Zusammensetzung der Legierung [68]. EMF – Legierungen haben im Vergleich zu EM – Legierungen höhere Schmelzintervalle. Diese liegen typischerweise zwischen 1300 °C und 1500 °C [37, 92].

Eine liquide Legierung erstarrt mit Erreichen der spezifischen Solidustemperatur. Wann die Solidustemperatur erreicht wird, ist u.a. abhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit, die von der Schmelze mitgeführte Wärmemenge an die Einbettmasse abgegeben werden kann [125, 127]. Durch die an der Formwand entstehenden Unterkühlungen wird die Keimbildung in Gang gesetzt [84]. Weitere Einflussfaktoren sind die Wahl der Einbettmasse, die geometrische Gestalt des zu gießenden Objektes sowie die Form- und Gießtemperatur. Die Wärme, die abgegeben wird, setzt sich zum einen aus der Schmelzwärme sowie aus der so genannten Erstarrungswärme, die bei der Kristallisation der Legierung durch Anlagerungen von Metallatomen an wachsende Kristallisationskeime entsteht, zusammen. Ist der Erstarrungsablauf (Keimbildung und Keimwachstum) einer Legierung bekannt, so kann auf deren gießtechnisches Verhalten geschlossen werden. Je mehr Wärme bei der Kristallisation abgegeben wird, desto länger ist die Erstarrungszeit der Legierung und desto mehr Zeit hat die Legierung den Muffelhohlraum vollständig auszufüllen [84].

Es werden exogene, von der Formwand ausgehende und endogene, im Inneren der Schmelze entstehende, Erstarrungstypen unterschieden (Abb. 3.3):

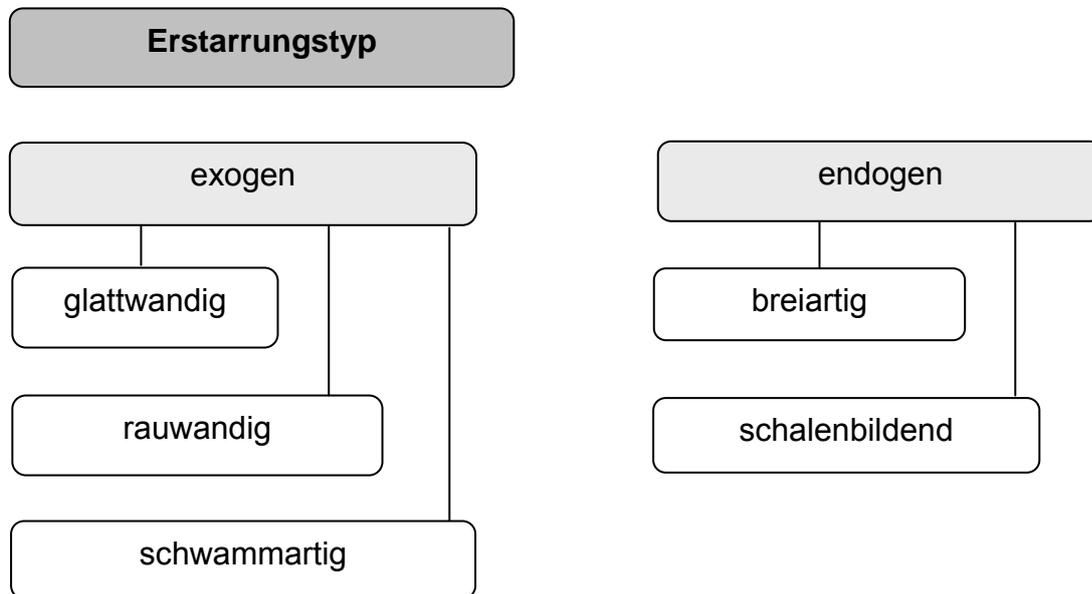


Abb. 3.3: Typische Arten des Erstarrungsablaufs

Die chemische Zusammensetzung des Metalls und deren Abkühlungsgeschwindigkeit beeinflussen die Ausbildung der verschiedenen Erstarrungstypen abhängig von der Art der Kristallisation. Wird der Legierungsgehalt erhöht, kann die Erstarrung über den rauwandigen zum schwamm- oder breiartigen Typ verschoben werden. Geht man vom Reinmetall aus, wird der Metallfluss durch die mit ansteigendem Legierungsgehalt verursachte rauwandige und schwammartige Erstarrung zunehmend behindert. Nähert man sich an eine eutektische Legierungszusammensetzung, so steigt das Fließvermögen aufgrund der schalenbildenen Erstarrung des Eutektikums wieder an [17, 23, 42, 107, 117].

### 3.1.4 Schmelz- und Gussverfahren

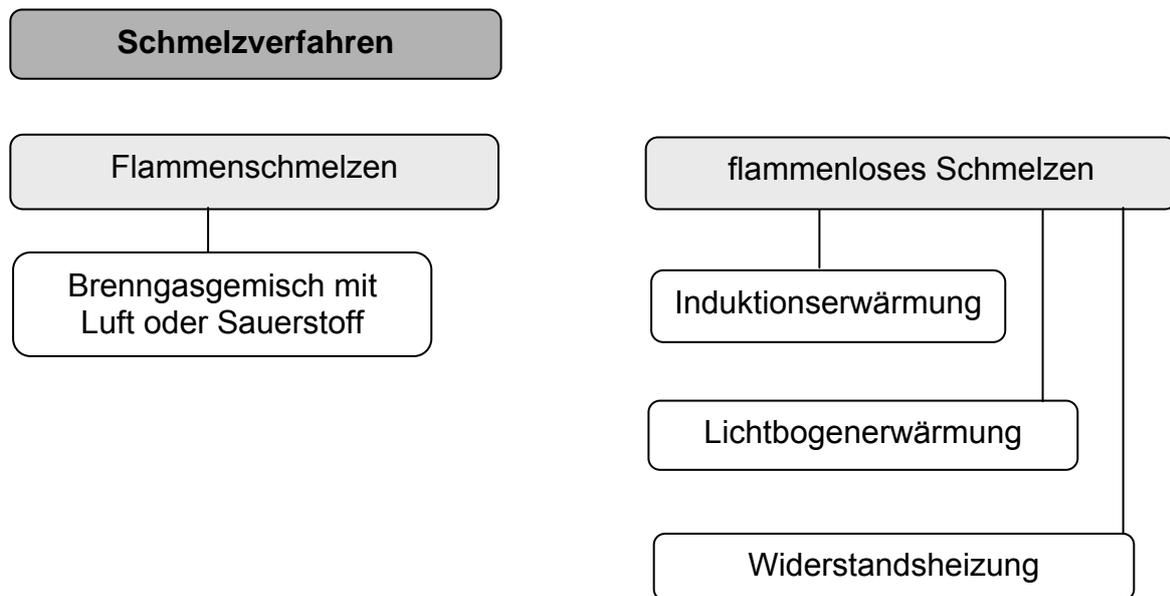


Abb. 3.4: Übersicht der in der Zahntechnik angewandten Schmelzverfahren

#### Schmelzen mit offener Flamme

Mittels eines Brenners wird das Metall in einem offenen oder geschlossenen Graphittiegel verflüssigt. Bei Verwendung eines offenen Tiegels ist eine exakte Zuführung von Wärme unmöglich. Die direkte Berührung des Metalls mit der Flamme kann zu starken Materialschädigungen durch Überhitzung führen. Der geschlossene Tiegel hat den Vorteil der kontrollierten und gleichmäßigen Metallverflüssigung. Eine optimal eingestellte Flamme und deren Führung beruht auf der Erfahrung des Zahntechnikers [23, 47].

#### Induktionserwärmung

Eine von hochfrequentigem Strom gespeiste Spule umgibt einen mit Schmelzgut befüllten keramischen Tiegel. Das erzeugte elektromagnetische Wechselfeld verursacht im Metall Wirbelströme, die sich durch den elektrischen Eigenwiderstand in Wärme umsetzen und das Metall schnell zum Schmelzen bringen (direktes Aufschmelzen). Durch die vom glühenden Graphit abgegebene Wärme wird das Metall indirekt aufgeschmolzen (indirektes Schmelzen). Ein spezieller Gussapparat steuert den Schmelzprozess elektrooptisch [23, 47, 129].

### Lichtbogenerwärmung

Ein zwischen zwei Elektroden geführter Gleichstrom – Lichtbogen erzeugt Wärmeenergie (mehr als 4000 °C), die durch Strahlung an das Schmelzgut übertragen wird. Transportiert wird der Lichtbogen durch Plasma (ionisierte Gase), das gleichzeitig als Schutzgas fungiert. Das rasante Schmelzen des Metalls bedarf der Kontrolle durch eine fotoelektrische Gießapparatur [23, 47].

### Schmelzen durch Widerstandsheizung

Widerstandsheizleiter, die sich bei Stromdurchfluss erwärmen, den Tiegel (i. d. R. Graphittiegel) erhitzen, bringen das Metall zum Schmelzen. Es lassen sich maximale Temperaturen von 1500 °C erreichen. Eine Überhitzung kann weitestgehend ausgeschlossen werden, da die Temperatur über einen elektrischen Regler reguliert wird [23, 47].

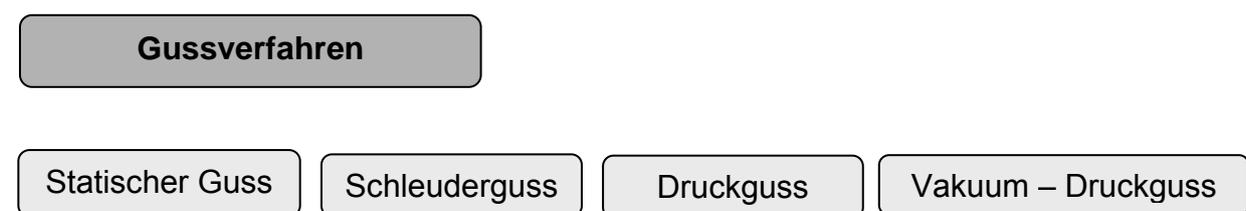


Abb. 3.5: Varianten zahntechnischer Gießverfahren

### Statischer Guss (Schwerkraftgießen)

Die Formfüllung erfolgt über die Schwerkraft der Schmelze, die durch ihr Eigengewicht über das Gusskanalsystem in den Gushohlraum fließt. Dieses Verfahren findet lediglich Anwendung bei der Herstellung von Zinnbasen, da der Fülldruck nicht ausreicht, um grazile Formteile der Kronen- und Brückentechnik vollständig auszufüllen [23, 47, 129]. Der Druck  $p$  ist proportional zur Formfüllung, zur Erdbeschleunigung  $g$ , der Dichte des Metalls  $\sigma$  und der Metallsäule  $h$ .

Glg. 3.1:  $p = g \cdot \sigma \cdot h$  mit

- $p =$  Druck
- $g =$  Erdbeschleunigung
- $\sigma =$  Dichte
- $h =$  Metallsäule

### Schleuderguss (Fliehkraftgießen)

Die durch eine hand-, bandabzugs- oder motorbetriebene Gusschleuder erzeugte Zentrifugalkraft presst das flüssige Schmelzgut in den Muffelhohlraum. Die Formfüllung graziler Formteile ist abhängig von der Höhe der wirksamen Fliehkraft. Die Größe der Zentrifugalkraft  $F_z$  ist abhängig von der Masse  $m$  (Menge des Gussmetalls), dem Radius  $r$  der Kreisbahn und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ , mit der die Gussform rotiert wird. Die folgende mathematische Formel beschreibt die Zentrifugalkraft [7, 23, 47, 129]:

Glg. 3.2:  $F_z = m \cdot \omega^2 \cdot r$  mit  $F_z =$  Zentrifugalkraft  
 $m =$  Masse  
 $\omega =$  Winkelgeschwindigkeit  
 $r =$  Radius der Kreisbahn

### Druckguss

Mittels atmosphärischen, Gas- oder Dampfdruck wird die Schmelze in die Gießform gepresst. Heutzutage wird der Druckguss nur noch in Kombination mit einem Vakuum angewendet. [23, 47, 129].

### Vakuum – Druckguss

Die Formfüllung erfolgt durch die Schwerkraft der Schmelze in Verbindung mit Druckluft. Nach dem Metallaufschmelzen wird die vorgewärmte Muffel auf den Gusstiegel gesetzt, der schwenkbare Kessel geschlossen und luftleer gepumpt. Nach Schwenkung des Kessels um  $180^\circ$  fließt die Schmelze aus dem Tiegel in die Gussmulde der Muffel, unterstützt durch zusätzlich zugeführte Druckluft [23, 47, 129]. Lediglich die Gewichtskraft  $F_G$  hat hier Einfluss auf die Formfüllung [7].

Glg. 3.3:  $F_G = m \cdot g$  mit  $F_G =$  Gewichtskraft  
 $m =$  Masse  
 $g =$  Erdbeschleunigung

### 3.1.5 Medizinproduktegesetz und Anforderungen an Dentallegierungen

Zahnersatz, der seine Funktion im medizinisch sensiblen Bereich der Mundhöhle bei der Nahrungsaufnahme aber auch in phonetischer und ästhetischer Hinsicht jahrzehntelang erfüllen soll, muss hohen Ansprüchen genügen. Zum Schutz des Patienten verlangt das Medizinproduktegesetz – kurz MPG – vom 2. August 1994, in Kraft getreten am 1. Januar 1995, von zahntechnischen Betrieben ein Qualitätssicherungssystem. Risiken von Material- und Verarbeitungsfehlern, die bei der zahnmedizinischen – zahntechnischen Versorgung gravierende gesundheitliche und finanzielle Folgen haben können, werden so minimiert. Die Verantwortung für ein Medizinprodukt liegt immer beim Hersteller, jedoch kann sich der Zahnarzt seiner Verantwortung nicht entziehen. Er ist verpflichtet die Medizinprodukte gemäß den Herstellerangaben zu verarbeiten. Bei falscher Umsetzung ist auch er haftbar. Er trägt die Verantwortung gegenüber dem Patienten [95].

Folgende Anforderungen an Dentallegierungen werden vom Zahnarzt, Zahntechniker und Patienten gestellt [97]:

- optimales Fließvermögen der geschmolzenen Legierung
- Passgenauigkeit des einzugliedernden Zahnersatzes (Kapitel 3.2.1)
- stark haftender Metall – Keramik – Verbund
- Farbechtheit der Keramik im Metall – Keramik – Verbund
- Korrekturresistenz (Passgenauigkeit bleibt trotz mehrmaliger Korrekturen am Zahnersatz erhalten)
- geringes spezifisches Gewicht (Kostenreduzierung und geringere Warmverformung des Werkstoffs)
- niedrige Wärme- und Temperaturleitfähigkeit
- gute und sichere Verarbeitung der Legierungen
- Mundbeständigkeit
- Wirtschaftlichkeit

## 3.2 Prüfverfahren zur Quantifizierung des Ausfließverhaltens von Legierungen

In der Vergangenheit wurden zahlreiche wissenschaftliche Studien erstellt, die sich mit dem dentalen Präzisionsguss und dessen beeinflussende Faktoren beschäftigten. Hauptaugenmerk lag auf der Verbesserung der Vergießbarkeit von dentalen Güssen und die daraus resultierenden Probleme.

### 3.2.1 Definition Vergießbarkeit

Die Vergießbarkeit stellt keine klar definierbare Eigenschaft einer Legierung dar, sondern man versteht darunter das Vermögen eines flüssigen Metalls, unter bestimmten Bedingungen eine vorgegebene Hohlform auszufüllen [80, 122, 125].

Die Gießbarkeit ist vor allem durch zwei Werkstoffeigenschaften gekennzeichnet:

- Fließvermögen
- Formfüllungsvermögen (engl. fluidity, flowability, flow property [24])

Unter dem Begriff „Gießbarkeit“ ist eine Eigenschaft einer Legierung zu verstehen, die sich aus den physikalischen Eigenschaften Viskosität und Oberflächenspannung (Kapitel 3.2.5) im schmelzflüssigen Zustand einer Legierung zusammensetzt.

Die Viskosität kennzeichnet die Zähflüssigkeit der Schmelze, welche durch die innere Reibung und den Formänderungswiderstand verursacht wird. Die Temperatur und die Viskosität stehen im umgekehrten Verhältnis zueinander. Mit steigender Temperatur der Schmelze nimmt die innere Reibung und somit die Viskosität ab, so dass das Fließvermögen umso günstiger wird [23, 42]. Der Gehalt an nichtmetallischen festen Einschlüssen und Gasen beeinflusst die Viskosität. Eine Temperatursteigerung verringert Viskosität und Dichte der Schmelze, wodurch eine verbesserte Fließfähigkeit erreicht wird [100].

Nach dem Guss muss eine ausreichend hohe Formfüllung gegeben sein. Laut BRUNNHUBER [23, 42] ist das Fließvermögen ein Maß dafür, wie weit das Metall in einer Form fließen kann, bis der Metallfluss durch die fortschreitende Erstarrung zum Erliegen kommt. Ausdruck des Fließvermögens ist die Auslauflänge, die der Metallfluss

in einem Kanal zurückgelegt hat. Ist die Form vor dem Beginn der Erstarrung nicht vollständig gefüllt, kommt es zum Auftreten von Auslauffehlern [23, 84, 96, 107].

Das Formfüllungsvermögen bezeichnet die Abbildungsfähigkeit und Konturenwiedergabe des Formhohlraumes, die durch die Oberflächenspannung, das Erstarrungsverhalten und die Abkühlungsgeschwindigkeit beeinflusst werden kann. Naturgemäß sollte die Abbildungsfähigkeit so genau wie möglich sein. Problematisch sind Ecken und Kanten, in die das flüssige Metall nur in begrenztem Maße eindringen kann, so dass als Folge Rundungen am Gussstück entstehen [23, 42, 84].

Die exakte Wiedergabe der Wachsmodellation mitsamt grazil gestalteten Strukturen eines Gussobjektes sowie die qualitativen Eigenschaften des Gussobjektes sind von folgenden Faktoren abhängig:

- Legierungstyp
- Thermische Parameter des Gusses (Vorwärm- und Gießtemperatur)
- Form des zu gießenden Objektes
- Art der Gusstechnik/ Gießverfahren
- Fähigkeit des Zahntechnikers

Alle Faktoren zusammen bezeichnen SUSZ, MEYER, BARRAUD als Fließvermögen [108].

Spricht man von *Passgenauigkeit* (engl. accuracy of fit [24]), so bezieht sich dies auf den einzugliedernden Zahnersatz, deren Anforderungskriterien sich am Patienten orientieren. Begriffe wie geringe Randspaltbreite (Sondenprobe  $< 50 \mu\text{m}$ ) [22], spannungsfreies Eingliedern mehrgliedriger Brücken, Klemm- und Spielpassung bei festsitzendem Zahnersatz, optimale Passgenauigkeit von Halte- und Stützelementen bei partiellem Zahnersatz sowie das druckstellenfreie Anliegen von großen Verbindern kennzeichnen einen präzisen Zahnersatz im Mund des Patienten. Eine große Bedeutung für die Passgenauigkeit haben die einzelnen Arbeitsschritte, die zu dem fertigen Zahnersatz führen. Dabei wird die Abhängigkeit der präzisen Verarbeitung der Materialien (Bsp. Abformmasse, Gips, Wachs, Einbettmasse) deutlich, wobei Zahnarzt, Zahntechniker und Patient einen gleichermaßen großen Einfluss haben [80, 97].

### 3.2.2 Einflussnehmende Größen auf die Formfüllung

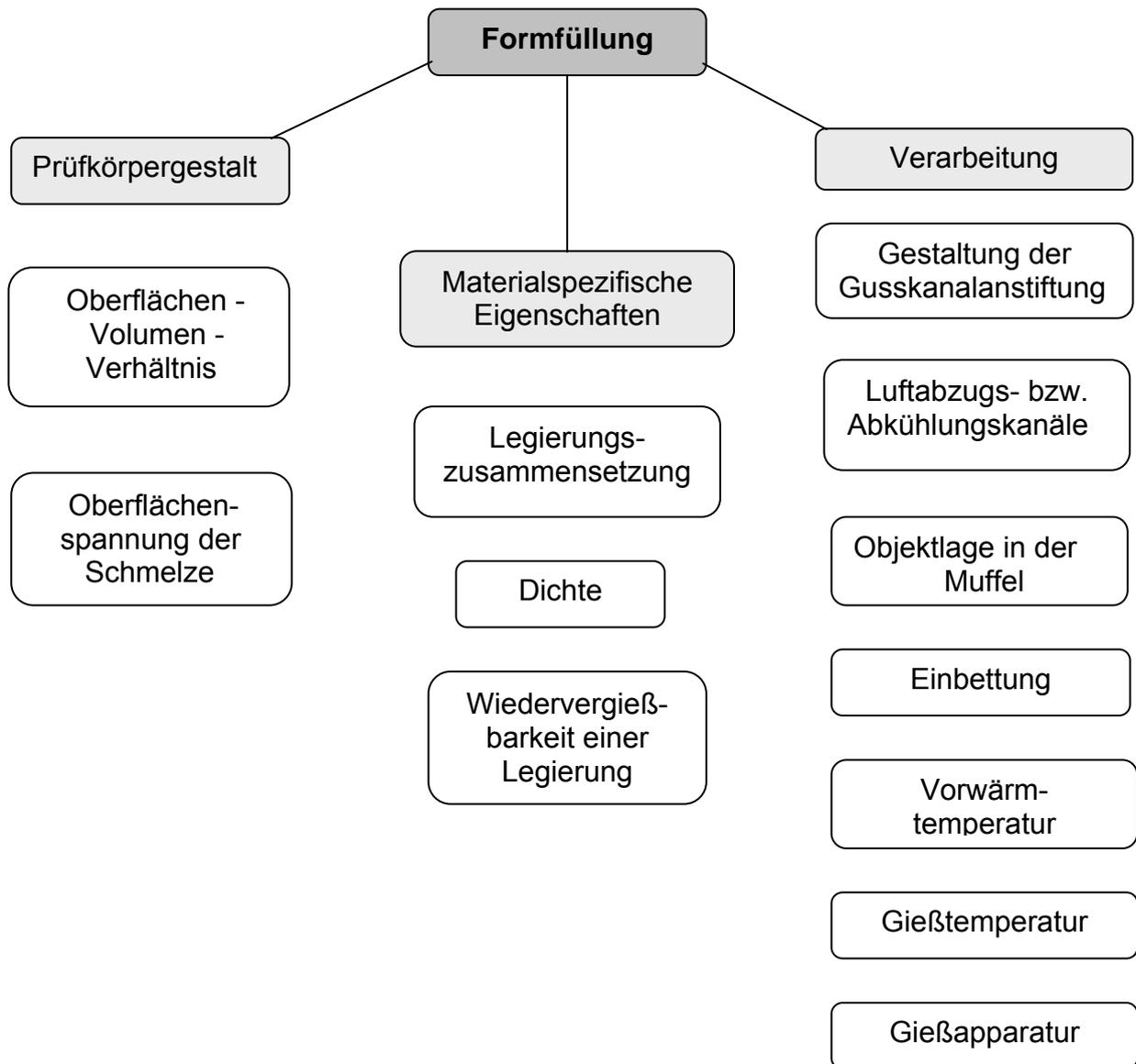


Abb. 3.6: Übersicht einflussnehmender Größen auf die Formfüllung

Neben der Gestalt des Prüfkörpers haben die materialspezifischen Eigenschaften sowie Fehler im Prozess der Verarbeitung einen entscheidenden Einfluss auf die Formfüllung.

### 3.2.2.1 Prüfkörpergestalt

#### Oberflächen – Volumen – Verhältnis

Die Oberfläche (abhängig von der Prüfkörperform) und das Volumen eines Körpers bestimmen dessen Abkühlungsgeschwindigkeit. Die im Körper enthaltene Wärme muss bei der Abkühlung durch die Oberfläche abgegeben werden. Ist diese groß, so kann die Wärme schnell entweichen [129].

Einige Autoren geben dem Volumen – Oberflächen – Verhältnis des Prüfkörpers eine besondere Bedeutung [7, 53, 93]. In der Gießtechnik wird das Volumen – Oberflächen – Verhältnis eines Gussstückes als Erstarrungsmodul  $M$  bezeichnet, welches maßgeblich die Erstarrungszeit  $t_{\text{Erst.}}$  bestimmt [18, 23, 35, 42, 53].

Glg. 3.4:  $M = \frac{V}{O}$  mit  $M =$  Erstarrungsmodul

$V =$  Objektvolumen

$O =$  Objektoberfläche

Glg. 3.5: 
$$t_{\text{Erst.}} = \left[ \frac{L + C_{\text{Leg.}} \cdot (T_1 - T_2) \cdot \sigma_{\text{Leg.}}}{(T_3 - T_4) \cdot \sqrt{\lambda \cdot C_{\text{Form}} \cdot \sigma_{\text{Form}} \cdot 1,158}} \right]^2 \cdot \left[ \frac{V}{O} \right]^2 \text{ min}$$

vereinfacht stellt sich die Formel im Folgenden dar:

$$t_{\text{Erst.}} = [k_{\text{CH}}]^2 \cdot \left[ \frac{V}{O} \right]^2 \text{ min} \quad \text{mit}$$

$L =$  Schmelzwärme

$T_1 =$  Gießtemperatur

$C =$  spezifische Wärme

$T_2 =$  Liquidustemperatur der Legierung

$\sigma =$  Dichte

$T_3 =$  Solidustemperatur der Legierung

$\lambda =$  Wärmeleitfähigkeit

$T_4 =$  Vorwärmtemperatur

$t_{\text{Erst.}} =$  Erstarrungszeit

$k_{\text{CH}} =$  Chourinowsche Konstante/ Erstarrungszeitkonstante  
(werkstoff-, temperatur- und formstoffabhängig)

Schwierig ist der Vergleich verschiedenartig geformter Prüfkörper mit unterschiedlichen spezifischen Volumina, die unter gleichen Bedingungen (beispielsweise gleiche Vorwärmtemperatur) unterschiedliche Erstarrungszeiten aufweisen. Die Erstarrungszeit steht in direktem Zusammenhang mit dem Oberflächen – Volumen – Verhältnis eines Testkörpers. Eine lange Erstarrungszeit bzw. verringerte Abkühlungsgeschwindigkeit kann gleichgesetzt werden mit einem hohen Formfüllungsvermögen und somit einem verbesserten Gussergebnis. BARGET empfiehlt daher bei einer Form mit kleinem spezifischen Volumen die Vorwärmtemperatur oder die Gießtemperatur zu erhöhen, um einen Ausgleich zum niedrigen Wert des spezifischen Volumens zu schaffen [7]. Ein Überhitzen der Schmelze oder ein zu hohes Vorwärmen der Muffel führen jedoch zu Gießfehlern, die die Gussqualität (grobes, teilweise dendritisches Gefüge mit Poren und Lunkern) verändern [62].

### **Oberflächenspannung**

Eine große Bedeutung für das Formfüllungsvermögen von Legierungen hat die Oberflächenspannung [52, 64, 70], die durch die an der Oberfläche einer Flüssigkeit angreifenden inneren Kräfte (molekulare Kohäsionskräfte) entsteht. Die Einbettmasse in der Muffel stellt einen Widerstand gegen das Eindringen der Schmelze in die Form dar. Die physikalische Formel der Oberflächenspannung  $\sigma$  ist wie folgt definiert [84, 105]:

$$\text{Glg. 3.6: } \sigma = \frac{dW}{dA} = \frac{F \cdot ds}{l \cdot ds} = \frac{F}{l} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} dW &= \text{verrichtete Arbeit} \\ dA &= \text{Flüssigkeitsoberfläche} \\ F \cdot ds &= \text{Kraftänderung um Betrag } ds \\ l \cdot ds &= \text{Vergrößerung der Oberfläche} \\ &\quad \text{der Länge } l \text{ um Betrag } ds \end{aligned}$$

Je höher die Oberflächenspannung der Legierung, desto ungünstiger wird die Muffeloberfläche und somit das Relief des Gussstückes wiedergegeben. Benetzt das flüssige Metall die Form, so vergrößert sich die Oberfläche des Metall – Form – Kontaktes, was eine Abkühlungsbeschleunigung des Metalls und somit eine verkürzte Fließzeit zur Folge hat [84].

Handelt es sich um einen Prüfkörper mit einem hohen Oberflächen – Volumen – Verhältnis, so treten hohe Oberflächenspannungskräfte der Metallschmelze auf. Diese Oberflächenspannungskräfte hindern die Metallschmelze die Einbettmasse vollständig zu benetzen und müssen überwunden werden. Um den Hohlraum nun vollständig auszufüllen, sind hohe Gießdrücke notwendig [22, 37, 107].

### 3.2.2.2 Materialspezifische Eigenschaften

#### Legierungszusammensetzung

Untersuchungen von MIMURA und NAKAI zum Fließverhalten von Nickel – Chrom – Legierungen zeigten, dass *Kobalt- sowie Molybdän-Zusätze* bis 5 % kein verändertes Fließverhalten der Legierungen zur Folge hatten. Enthielten die Nickel – Chrom – Legierungen *Kupfer- und Molybdänzusätze* über 5 % nahm die Fließfähigkeit signifikant ab. Demnach sollte auf den Zusatz größerer Mengen von Molybdän und Kupfer in Nickel – Chrom – Legierungen verzichtet werden [71].

Zusätze von *Mangan, Silizium und Beryllium* erhöhen die Fließfähigkeit und verbessern somit die Vergießbarkeit einer Legierung. In Studien von PAULINO, BEZZON, LACEFIELD sowie MITCHELL wurde der Einfluss von Beryllium hinsichtlich einer verbesserten Fließfähigkeit bewiesen [20, 80, 65, 72, 110]. COHEN wies darauf hin, dass Beryllium – Zusätze in einer Nickel – Chrom – Legierung bis 1 % einen Anstieg der Fließfähigkeit verursachten, Zusätze von 1,5 % bis 2 % ließen die Werte der Formfüllung jedoch leicht sinken [29]. Dem widersprechen die Versuchsergebnisse von PRESSWOOD, wo Nickel – Chrom – Legierungen mit einem Berylliumgehalt unter 2 % die höchsten Formfüllungswerte gegenüber aufbrennfähigen EM – Legierungen zeigten [85]. Eine verringerte Vergießbarkeit Beryllium – freier Legierungen begründete MITCHELL mit der durch Oxidation entstandenen grünen Oxidschicht der Schmelze, die die Gitterfreiräume verstopft. Demnach wird der Metallfluss behindert, indem die Oxidschicht einen Widerstand zur Metallströmung leistet und somit das Fließvermögen der Legierung verschlechtert [72]. Positiv beeinflusst wird die Vergießbarkeit unter anderem auch durch Zusätze wie *Bor, Gallium und Zink*, bezogen auf eine Palladium – Kupfer – Gallium – Gold – Legierung [94].

Nickel – Chrom – Basislegierungen erzeugen zusammen mit Legierungen auf der Basis von Palladium höchste Fließraten, wohingegen Gold – Basislegierungen am geringsten ausflossen [27, 43, 60]. Dem widersprechen Untersuchungen von SMITH, DECKMAN

und FAIRHURST sowie LACEFIELD, wo Edelmetall – Legierungen höhere Fließwerte erzeugten [65, 99].

### Dichte

Die Dichte  $\rho$  eines Körpers ist das Verhältnis seiner Masse  $m$  zu seinem Volumen  $V$  [105].

Glg. 3.7:  $\rho = \frac{m}{V}$  mit  $\rho =$  Dichte  
 $m =$  Masse  
 $V =$  Volumen

Die Füllung der Gussform ist zum einen abhängig von der Druckentwicklung an einem bestimmten Punkt in der Gussform  $P$ , die wiederum direkt proportional der Dichte  $D$  des jeweiligen vergossenen Metalls ist. Zum anderen steht die beim Schleuderguss auftretende Zentrifugalkraft  $F_Z$  und die beim Vakuum – Druckguss auftretende Gewichtskraft  $F_G$  in einem direkten Zusammenhang zur Dichte  $D$ . Dem widerspricht ENAMES mit seinen Untersuchungsergebnissen bezogen auf die Testung von Goldbasis – sowie Silberbasislegierungen [34].

Bezogen auf den Schleuderguss soll die Rotationsgeschwindigkeit  $\omega$ , die mit der Druckentwicklung an einem bestimmten Punkt in der Gussform in einem quadratischen Zusammenhang erläutert, hier nicht näher betrachtet werden. Praktisch betrachtet, muss für das Vergießen einer Goldlegierung (angenommene Dichte  $18 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ) der Gießdruck doppelt so hoch sein wie für eine Nickel – Chrom – Legierung (angenommene Dichte  $9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ), vorausgesetzt die übrigen Variablen sind konstant [124].

Grundlage dieser Überlegungen bildet folgende mathematische Formel aus der Mechanik von Flüssigkeiten [124]:

$$\text{Glg. 3.8: } P = \frac{\omega^2}{K} \cdot (r_A^2 - r_B^2) \cdot D \quad \text{mit}$$

P = Druck an einer Stelle in der Gussform, die von der Achse der Schleuder die Entfernung  $r_A$  hat

$\omega$  = Rotationsgeschwindigkeit

K = Konstante

D = Dichte der Legierung

$r_A$  = Abstand zwischen Druckmessungspunkt und Achse der Schleuder

$r_B$  = Abstand zwischen Oberfläche des Gusskegels und der Achse der Schleuder

Beim Vakuum – Druckguss entspricht die Krafteinwirkung der Schmelze auf die Gießform zum Zeitpunkt des Einschießens der Schmelze dem Gewicht der Schmelze (Glg. 3.3). Dahingegen ist die Schmelze beim Schleuderguss einer schlagartig hohen Beschleunigung ausgesetzt, woraus eine hohe Zentrifugalkraft (Glg. 3.2) und somit eine höhere Formfüllung resultiert [7].

Die Dichte beeinflusst nach VINCENT die Fließlänge einer Legierung. Je höher die Dichte einer Legierung (hohe Masse), desto höhere Fließraten werden erzielt. Je geringer die Dichte ist, desto höhere Gießkräfte müssen gewählt werden (bezogen auf den Schleuderguss), um gleiche Ergebnisse zu erhalten [116].

### **Wiedervergießbarkeit einer Legierung**

Das Formfüllungsvermögen einer Legierung wird unter anderem maßgeblich durch die Häufigkeit der Wiederverwendung einer Legierung beeinflusst [65]. Jedoch konnte KAMINSKI diesbezüglich beim Vergleich von Silber – Basis – Legierungen keine signifikanten Unterschiede in der Datenanalyse feststellen. Er machte aber den Mehrfachguss für das Entstehen von Porositäten im Gussobjekt verantwortlich [61].

### 3.2.2.3 Verarbeitung

#### Wachsauswahl, Gusskanalgestaltung

Bei der Auswahl der Wachse sollten möglichst reine, rückstandslos verbrennbare Produkte verwendet werden. Es sollten keine Metalloxide enthalten sein sowie sollte beim Verarbeiten eine Überhitzung und Verunreinigung vermieden werden [37, 107].

Die Herstellung einer Hohlform nach dem Wachsausschmelzverfahren setzt voraus, dass es einen Weg geben muss, über den das verflüssigte oder gasförmige Wachs austreten kann. Über den so genannten Gusskanal wird das flüssige Metall in die Hohlform gegossen.

STRICKLAND, ASGAR und PEYTON weisen auf die Bedeutung der Gusskanalgröße, der Form [113] sowie Lokalisation und Ausrichtung des Gusskanals hin [6, 101].

Die Kontaktfläche zwischen dem Gusskanal und dem Prüfkörper aus Wachs nimmt dabei eine besondere Stellung ein. Je größer die Kontaktfläche, desto höher ist die Fließfähigkeit [78]. ASGAR und PEYTON geben dieser Kontaktstelle die Funktion eines Schmelzreservoirs, von dem aus beim Erstarrungsprozess flüssiges Metall, in ihren Untersuchungen wurde Gold verwendet, in den Muffelhohlraum nachfließen kann [6]. Es wird behauptet, dass sich durch eine sich verjüngende Kontaktstelle zum Prüfkörper hin, die Geschwindigkeit der flüssigen Legierung am Übergang zum Muffelhohlraum erhöht, bedingt durch den physikalischen Venturi – Effekt, wodurch die Dichte der Gießobjekte erhöht wird [38].

Generell sollten die Gusskanäle so kurz wie möglich gehalten werden [129]. Laut HARASZTHY und WEBER wird durch einen kurzen Gusskanal der Weg für die Schmelze sowie die Füllzeit entsprechend verkürzt [41]. Ist der Gussweg zu lang und zu schmal, geht die Schmelzwärme schneller verloren, so dass die Schmelze erstarrt, bevor sie die gesamte Hohlform füllen kann [90, 124, 129]. Folge ist ein nicht vollständiger Guss des Probegitters. Die Ergebnisse TANQUISTS stimmen mit denen von ASGAR und PEYTON [6], COOPER [30], VAIDYANATHAN [114], DUDEK und TESK [33] überein.

Die Gusskanaldicke ist abhängig von der Viskosität der Schmelze und dem Gussverfahren. Generell gilt, dass ein dicker Gusskanal vorteilhafter ist als ein dünnerer, da letzterer die Schmelze abbremsen würde [129]. Die Literaturrecherche ergab eine direkte Proportionalität zwischen der Formfüllung und dem Radius des

Gusskanals [26]. Untersuchungen ergaben einen signifikanten Einfluss der Gusskanalform sowie deren Ausrichtung auf die Fließfähigkeit von Kobalt – Chrom – Legierungen [92]. Ein konischer bzw. ausgestellter Gusskanal lieferte im Vergleich zu dem traditionell verwendeten zylindrischen Gusskanal mehr komplette Güsse [76]. RIEGER und TANQUIST begründeten dies mit dem hohen Oberflächen – Volumen – Verhältnis der zylindrischen Gusskanalform, wodurch es zu einer verfrühten Erstarrung und somit zu weniger kompletten Güssen kommt [90]. In den Versuchen von VERRETT und DUKE wurde untersucht, welchen Einfluss die Gestaltung des Gusskanals auf die Fließfähigkeit von einer EM – Legierung hat. Eine gerade und am Übergang zum Probenkörper ausgestellte Gusskanalform lieferte dabei höhere Formfüllungswerte als ein sich verjüngender Gusskanal [115].

Es wird des Weiteren empfohlen, dass der Gussstift in der Verlängerung der Längsachse des Gussobjektes liegen soll, so dass die Schmelze beim Einfließen möglichst wenig Richtungsänderung erfährt. Eine Anbringung des Stiftes im rechten Winkel zum Gussobjekt würde ein Abbremsen der Schmelze bewirken, was einen inkompletten Guss zur Folge hätte [129].

### **Luftabzugs- bzw. Abkühlungskanäle**

Abzugskanäle sind am Gussobjekt angebrachte Hilfskanäle, die die im Muffelhohlraum befindliche Residualluft sowie die beim Einschießen der Schmelze mitgerissene Luft nach außen tragen sollen, um ein feinkörniges, lunkerfreies und vollständig ausgeflossenes Gussobjekt zu erhalten. Zu beachten ist, dass die Abzugskanäle keine Anwendung in der Vakuum – Druckguss – Technik finden, da während des Einschießens des flüssigen Schmelzguts der Gießraum evakuiert ist und ein Luftzu- bzw. -abgang nach außen der Formfüllung entgegenwirken würde. Deren Anwendung ist umstritten, da durch die üblichen Vorwärmtemperaturen von 700 – 1000 °C eine so starke Luftverdünnung entsteht, dass der Muffelraum fast luftleer ist [129]. BELOHLAVEK bewies in seinen Filmstudien zum Druck- und Schleuderguss, dass die so genannten Luftabzugskanäle nicht als Luftabzug fungieren können, da diese gleich zu Beginn des Gussvorgangs mit flüssigem Metall verschlossen werden [16].

In der angloamerikanischen Literatur existieren zwei Begriffe mit unterschiedlicher Bedeutung bezüglich des Abzugskanals. Mit „vents“ ist die Ventilfunktion (Abzug von Luft) gemeint wie sie oben beschrieben ist. Die so genannten „chill – sets“ oder auch

Abkühlungskanäle stehen für die Wärmeableitung während des Erstarrungsprozesses und verursachen eine gerichtete Erstarrung der flüssigen Legierung [124].

Funktionell dienen Abzugskanäle der gezielten Wärmeableitung des Gussobjektes, wodurch die Erstarrung des Metalls günstig beeinflusst wird. BELOHLAVEK empfiehlt in seiner Lomalinda – Studie Abkühlungskanäle mit einer großen Oberfläche und einem geringen Volumen und eine möglichst nahe Platzierung an der Muffelwand, damit die Abkühlung entsprechend begünstigt wird [16, 88].

Bezogen auf Nickel – Basis – Legierungen erzielte das Anbringen von Luftabzugs- bzw. Abkühlungskanälen eine gesteigerte Formfüllung [121, 124].

### **Objektlage in der Muffel**

Empfohlen wird eine mittige Positionierung des Gusskanals in der Muffel, da dort das thermische Zentrum liegt, wo das Metall erst relativ spät erstarrt [16]. Ein mindestens 5 mm großer Abstand des zu gießenden Objektes vom Muffelboden sollte eingehalten werden, da ansonsten eine zu schnelle Auskühlung der Einbettmasse mit einer frühzeitigen Erstarrung der Metallschmelze erfolgt. Ein unvollständiger Guss wäre die Folge [41].

In einer Studie, die den Zusammenhang zwischen der Objektlage in der Muffel und der Vollständigkeit des Gusses beschreibt, wurden maximale Ergebnisse erzielt, wenn das Objekt in einem 90° bis 135° Winkel am Gusskanal fixiert wird [92], so dass es sich im unteren äußeren Viertel der Muffelringhälfte befindet. Das ist der Bereich, wo die resultierende Beschleunigungskraft, Zentrifugalkraft sowie Schwerkraft auf die flüssige Legierung wirkt [31].

### **Einbettung**

Grundsätzlich unterschieden werden gipshaltige und gipsfreie Einbettmassen. Da sich gipsgebundene Einbettmassen bei Vorwärmtemperaturen der Muffel über 700 °C unter Gasabgabe zersetzen, kommen sie für Aufbrennlegierungen nicht in Frage [112]. Für diese sind gipsfreie Einbettmassen obligat, die kein Graphit enthalten sollten, da dieser zu Verunreinigungen im Gussgefüge führen kann. Folgende Maßnahmen sollten eingehalten werden, um eine adäquate Qualität der Einbettmasse zu gewährleisten:

1. Trockene Lagerung des Einbettmassepulvers, da das Pulver hygroskopisch ist
2. Die Aufbewahrung der Anmischflüssigkeit im richtig eingestellten Kühlschranks

3. Genau dosiertes Anmischen von Pulver und Flüssigkeit im Vakuumrührgerät sind selbstverständlich, da sonst die notwendigen Expansionswerte bei der Abbindung der Einbettmasse, über die Kontraktion des erhitzten Metalls beim Abkühlen aufgefangen werden soll, nicht erreicht werden [129]. Wichtig ist das richtige Mischungsverhältnis Liquid – Wasser [2]. Mit einem 3/1 Verhältnis Liquid/Wasser konnten in der Studie von SMITH erhöhte Werte in der Kronenpassung erzielt werden [98].

Die Art der Einbettung hat nach einer Studie von JOHNSON und WINSTANLEY keinen signifikanten Einfluss auf die Fließfähigkeit [60]. Gleiches gilt für die Verwendung von asbestfreien und asbesthaltigen Muffeleinlagen [99]. Jedoch hat die Menge der verwendeten Asbest – Muffeleinlagen einen signifikanten Einfluss auf die Vergießbarkeit [98]. Die Studie von BARRETO zum Einfluss verschiedenartiger phosphatgebundener Einbettmassen auf das Fließverhalten von EM – und EMF – Legierungen ergab deutlich qualitative sowie quantitative Unterschiede. Drei unterschiedliche phosphatgebundene Einbettmassen erzeugten demnach bei der gleichen Legierung signifikant unterschiedliche Fließlängen [8]. In der Studie von PINES konnte eine signifikant höhere Detailwiedergabe des Nielsen – Shalita Prüfkörpers bei Verwendung einer phosphatgebundenen Einbettmasse erzielt werden [82].

HARASZTHY und WEBER geben der Stärke, Dicke der Einbettmasse am Übergang der unteren Biegung des Gusskanals zum Muffelboden eine besondere Bedeutung. Eine 5 mm starke Einbettmasseschicht speichert weniger Wärme und lässt die Schmelze somit schneller auskühlen, so dass ein unvollständiger Guss entsteht [41]. Demnach hat das Einbettmassevolumen einen positiven Effekt auf die Formfüllung. Die Erstarrungszeiten sind demnach in 3er Muffeln länger als in 1er Muffeln [111].

### **Vorwärmtemperatur**

Nachdem die Einbettmasse abgebunden hat, wird die Muffel umgekehrt in einen Vorwärmofen gestellt, um so ein Ausfließen des Wachses und damit das Entstehen einer Hohlform zu ermöglichen. Das Wachsaustreiben sollte relativ zeitnah nach dem Einbetten erfolgen, um eine rückstandslose Entfernung des Wachses zu erreichen. Eine Studie von BARRETO ergab signifikant unterschiedliche Fließlängen nachdem die Muffeln unterschiedlich (Zimmertemperatur, Feuchtraum), vor dem Wachsaustreiben, gelagert wurden [8]. Grundvoraussetzung für ein kontrolliertes und damit erfolgreiches

Vorwärmen und Aufheizen ist ein programmierter, kalibrierter und von vier Seiten beheizbarer Umluftofen, um die Muffel gleichmäßig von allen Seiten aufzuwärmen. Ist die Muffel nicht ausreichend durchgewärmt, so entweicht Wärme schon im Gusskanal, wodurch die Viskosität der Schmelze herabgesetzt wird und ein unvollständiger Guss entsteht [125]. Hier wird die Temperatur bis ca. 300 °C gleichmäßig um 8 °C bis 10 °C pro Minute erhöht. Die Restfeuchtigkeit der Einbettmasse entweicht als Wasserdampf und treibt das sich verflüssigende Wachs aus, so dass eine Hohlform entstehen kann. Durch das langsame Erwärmen wird verhindert, dass Risse in der Einbettmasse entstehen können. Es ist wichtig, die Aufwärmtemperatur bei 300 °C für eine Stunde zu halten, damit sich die Innentemperatur der Muffel, die durch die Verdunstung des Wassers sehr lange bei 100 °C bleibt, der Außentemperatur im Ofen angleichen kann. Ab 300 °C beginnt die Aufheizphase. Bei etwa 220 °C bis 270 °C wird eine Haltezeit von ungefähr 40 Minuten für den so genannten Cristobalitsprung (große Expansion des Cristobalits) eingelegt. Bei etwa 580 °C findet die Umwandlung von Alpha- in Betaquarz und zwischen 820 °C und 870 °C die Verglasung der Quarzteile der Phosphat-einbettmasse statt. Danach kann die endgültige Temperatur angesteuert werden (Modellgusslegierungen -> 950 °C bis 1050 °C; EMF – Aufbrennlegierungen -> 900 °C) [129].

Eine gesteigerte Formfüllung verschiedener Prüfkörperformen unter dem Einfluss einer zunehmenden Muffeltemperatur wurde in zahlreichen Studien belegt [28, 50, 59, 112]. Es wurden EMF – und EM – Legierungen untersucht. Erklärung dazu liefert BERNSDORFF in seinen Untersuchungen. Eine verminderte Temperatur der Einbettmasse bewirkt eine schnelle Aufnahme der mitgeführten Schmelzwärme sowie der bei der Kristallisation entstandenen Erstarrungswärme. Eine rasche Abkühlung der Schmelze zieht somit eine frühe/hohe Keimbildungsrate und einen unvollständigen Guss nach sich. Im Gegensatz dazu kann eine zu stark erhitzte Einbettmasse weniger schnell Wärme aufnehmen, so dass die Abkühlung langsamer erfolgt. Ein grobes Gefüge, aber eine höhere Formfüllung resultiert [18].

JARVIS stellte zudem fest, dass die Fließfähigkeit mit zunehmender Vorwärmtemperatur linear ansteigt. Zum gleichen Schluss kamen HIRANO und TESK [50]. Mit steigender Vorwärmtemperatur nimmt die Oberflächenrauigkeit der hergestellten Proben zu [59]. Jedoch hat nach ASGAR und PEYTON die Temperatur der Muffel nur einen geringen Effekt auf das Gefüge [5].

BARGET konnte rechnerisch den Unterschied im Ausfließverhalten mit Bezug auf die Vorwärm- und Gießtemperatur zwischen edelmetallreduzierten Aufbrennlegierungen und Kobalt – Chrom – Legierungen anhand der mathematische Definition des Wärmestroms  $Q_z$  (Glg. 3.9) belegen. Laut seinen Berechnungen zum Wärmestrom  $Q_z$  schlussfolgerte er, dass die edelmetallreduzierten Aufbrennlegierungen in ihrem Ausfließverhalten wesentlich niedrigere Werte aufweisen als die Kobalt – Chrom – Legierungen. Er begründete den Sachverhalt mit der hohen Differenz zwischen Vorwärmtemperatur und Gießtemperatur. Würde man die Temperaturdifferenz der edelmetallreduzierten Aufbrennlegierungen verringern, sprich die Gießformen höher vorwärmen, wird die Abkühlungsgeschwindigkeit reduziert und ein höhere Formfüllung erzielt [7].

$$\text{Glg. 3.9: } Q_z = C \cdot F \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \quad \text{mit}$$

$C =$  Strahlungskonstante  
 $F =$  Oberfläche des Gussobjektes  
 $T_1 =$  Gießtemperatur  
 $T_2 =$  Vorwärmtemperatur

AGERWAL konnte in seiner Studie zum Vergleich verschiedener Testverfahren die Bedeutung der Muffeltemperatur hervorbringen. Demnach bewirkt ein Anstieg der Vorwärmtemperatur eine signifikant höhere Formfüllung des Prüfkörpers [70, 72, 79, 82, 113, 128], jedoch erst oberhalb einer bestimmten Schwellenwert – Temperatur. Unterhalb dieser Temperatur flossen nur wenige Segmente des netzförmigen Prüfkörpers aus [1, 57]. Dem widerspricht der Hersteller WHIP MIX, der in seinen Anleitungen zur Einbettmasse – Verwendung angibt, dass die niedrigsten Vorwärmtemperaturen die höchsten Fließraten erzeugen [60]. Gleiche Schlüsse zog SMITH in seinen Untersuchungen, wo erhöhte Muffeltemperaturen qualitativ (ansteigende Oberflächenrauigkeit) und quantitativ (reduzierte Detailwiedergabe) schlechtere Gussergebnisse zur Folge hatten [98].

## **Gießtemperatur**

Das Ziel des Gießens ist ein vollständig ausgeflossenes, passgenaues, dichtes Gussstück mit einwandfreier Oberfläche und sauberem, feinkörnigen Gefüge herzustellen [107].

Ein Überhitzen der Schmelze muss vermieden werden, um die physikalischen Eigenschaften der entstandenen Gussobjekte nicht negativ zu beeinflussen [112]. Eine Überhitzung führt zu einem grobkörnigen Gefüge und zu einer ungünstigen Veränderung mechanischer Parameter (Zunahme der Härte, Abnahme der Festigkeit und des Elastizitätsmoduls) [87]. Jedoch ist ein gewisses Maß an Überhitzung notwendig, um optimale Resultate bezüglich der Fließfähigkeit zu erzielen [48, 82]. Nach AGAR und PEYTON entstehen durch zu hohe Gießtemperaturen Karbidverbindungen, die wiederum für höhere Dehnwerte verantwortlich sind (Versuchsgrundlage waren Kobalt – Basis – Legierungen) [5]. Der richtige Gießzeitpunkt ist dann erreicht, wenn die Oxidschicht der erhitzten Legierung komplett verschwunden ist [77].

In der Studie von JOHNSON und WINSTANLEY ergaben um 100 °C erhöhte Gießtemperaturen von drei unterschiedlichen Legierungstypen (Gold, Palladium und Ni – Cr – Legierungen) erhöhte Fließraten [60]. Die Ergebnisse stimmen mit denen von PRESTON und BERGER [86], HINMAN et al. [48], THOMPSON [112], TANGSGOOLWATANA et al. [110] sowie VAIDYANATHAN [113] überein. Einen linearen Anstieg der Fließfähigkeit mit steigender Gießtemperatur stellte HERO bei drei getesteten Kobalt – Chrom – Molybdän – Legierungen fest [44]. Laut HINMAN ist der Einfluss von Vorwärm- sowie Gießtemperatur gleichwertig. Es wurde für die zwei untersuchten NEM – Legierungen ein optimaler Temperaturbereich gefunden, über dem die Fließfähigkeit nur noch gering ansteigt [48].

## **Gießapparatur**

Eine erhöhte Gießkraft bewirkt nach VINCENT [116] und JOHNSON et al. [60] erhöhte Fließlängen. Eine Fließlängensteigerung wird zum einen durch die Zunahme der Masse des zu vergießenden Metalls (Menge des Metalls) oder zum anderen durch Zunahme der Beschleunigung beim Schleuderguss erzeugt. Laut PINES hat jedoch der Gießdruck einen weniger signifikanten Einfluss auf das Fließverhalten [82]. Jedoch bewiesen ASGAR und ARFAEI, dass unterschiedliche Gießmaschinen signifikant unterschiedliche Ausfließraten erzeugen. Dabei hat die Art der verwendeten Gießapparatur einen bedeutenden Effekt auf die Fließfähigkeit der jeweils untersuchten Legierung [4].

Nach HARASZTHY und WEBER lassen sich edelmetallreduzierte Legierungen besser mit Schleudergussanlagen vergießen als mit Vakuum – Druckguss – Geräten [41]. Gleiches stellte TAKAHASHI beim Verguss von Reintitan fest [109].

Die Versuchsergebnisse von SATOH verdeutlichen, dass die Vakuum – Druckguss – Methode einen signifikanten Einfluss auf die Fließfähigkeit von Kobalt – Chrom – Legierungen hat [92]. Der Vakuum – Druckguss ist dem Schleuderguss bezüglich der gesteigerten Formfüllung von EM – und Nickel – Chrom – Legierungen [93] sowie von Goldbasis – und Silberbasis – Legierungen [34] überlegen.

Qualitative Analysen von EM – Legierungen ergaben ein feinkörnigeres Gussgefüge von Schleuderguss erzeugten Probenkörper als mit dem Vakuum – Druckguss – Verfahren vergossen [93]. Das Gussgefüge von Nickel – Chrom – Legierungen ist nach dem Vakuum – Druckguss stärker entmischt, inhomogener [92].

### **3.2.3 Anforderungen an Testverfahren**

Experimentelle Untersuchungen, die sich mit der Vergießbarkeit von Dentallegierungen beschäftigen, stehen vor der Schwierigkeit eine Prüfkörperform zu finden, die es erlaubt eine Aussage über die Quantität der ausgeflossenen Legierung zu treffen.

Ein Verfahren, das zur Überprüfung der Fließfähigkeit einer Dentallegierung dient, sollte nach HINMANN et al. [49] folgende Eigenschaften aufweisen:

1. Reproduzierbare Ergebnisse sind notwendig, um das Fließvermögen einer Legierung bewerten zu können.
2. Die Methode sollte mit handelsüblichen Materialien, Geräten, die die dentale Industrie bereitstellt, durchführbar sein.
3. Die experimentellen Bedingungen in Dentallaboren sollten eine Vervielfältigung des Prüfkörpers unter gleichen Verhältnissen ermöglichen.
4. Die Muffel und Prüfkörperform sollten einfach herstellbar sein.
5. Die gegossenen Prüfkörper sollten objektiv auswertbar sein ohne komplizierte Meßapparaturen benutzen zu müssen.
6. Die Methode sollte so konzipiert sein, dass verschiedene die Formfüllung beeinflussende Faktoren untersucht werden können, um aussagekräftige Resultate zu erhalten.

### **3.2.4 Prüfkörperformen zur Messung der Vergießbarkeit von Legierungen**

Um die Eigenschaft der Vergießbarkeit von Dentallegierungen experimentell zu ermitteln, kamen bisher verschiedenste Prüfkörperformen und Testverfahren zur Anwendung.

Die folgende Abbildung 3.7 zeigt die in der Literatur dargestellten unterschiedlichen Prüfkörperformen, ergänzt durch die jeweiligen Autoren und das Erscheinungsjahr. Der Übersicht folgend wird aus jeder Prüfkörperform – Kategorie mindestens je ein Prüfkörper fotografisch dargestellt und die Gestalt sowie das Ziel der entsprechenden Untersuchung erläutert.

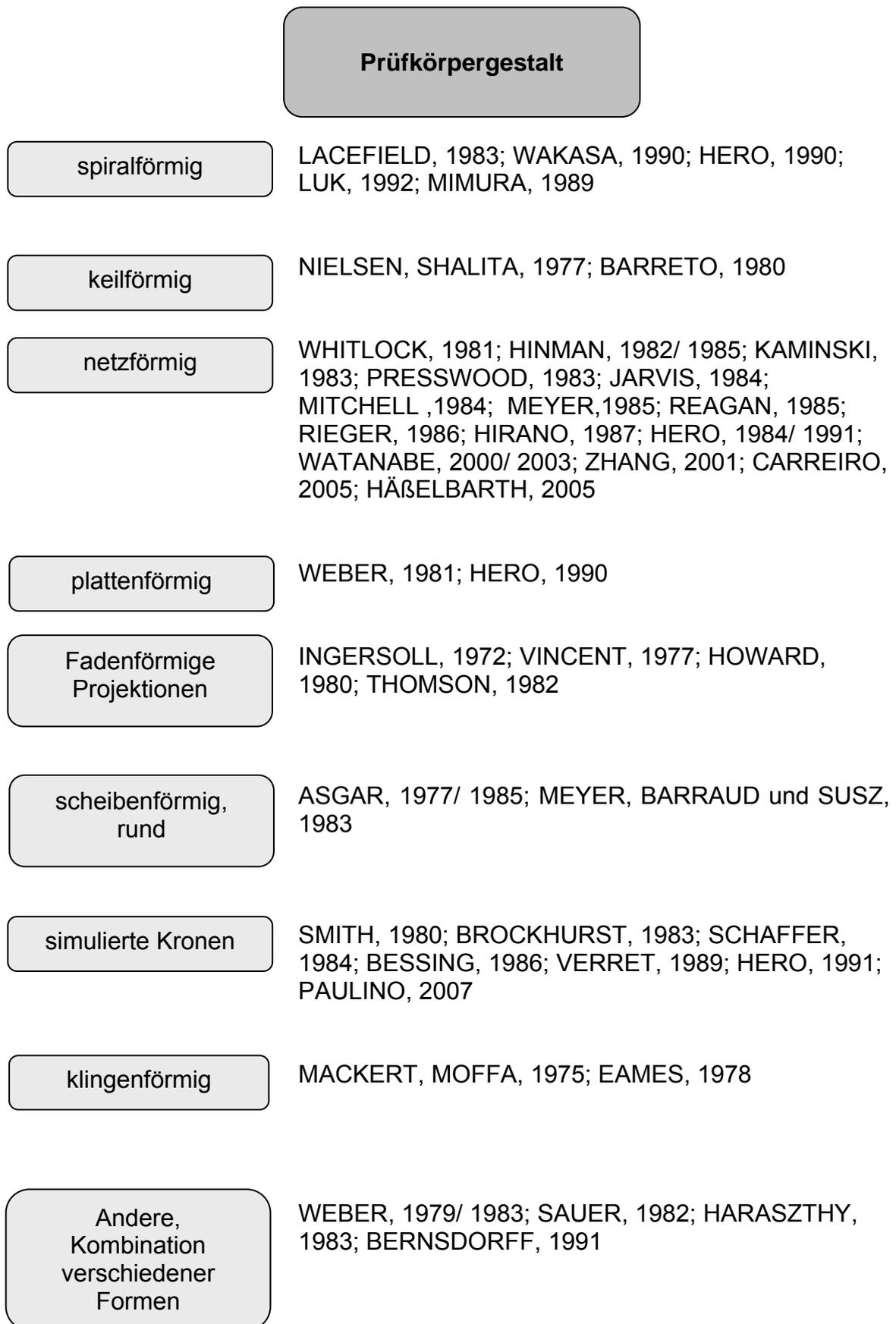


Abb. 3.7: Prüfkörperform – Kategorien, mit Angabe des Autors/ Erscheinungsjahr

### Prüfkörpergestalt – spiralförmig

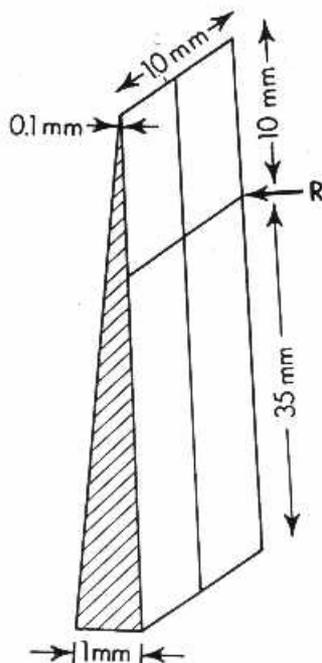


Als Grundform verwendete INGERSOLL Wachsspiralen mit einer Länge von 100 mm, 16 Gauge (= 1,29 mm) im Durchmesser.

Vergossen wurden Aufbrennlegierungen zum einen mit einer Horizontal – Guss – Schleudermaschine und zum anderen mit einem Vakuumgussapparat.

Abb. 3.8: Prüfkörper nach INGERSOLL, 1972 [57]

### Prüfkörpergestalt – keilförmig



Grundlage der Gießversuche bildete ein keilförmiger Wachsplattenkörper wie in der nebenstehenden Abbildung gezeigt. Er wurde der gesamten Länge nach an einen Muldenformer fixiert.

Untersucht in ihrer Fließeigenschaft in Abhängigkeit von drei verschiedenen phosphatgebundenen Einbettmassen wurden eine EM- und drei NEM – Legierungen.

Abb. 3.9: Prüfkörper nach BARRETO, 1980 [8]

## Prüfkörpergestalt – netzförmig

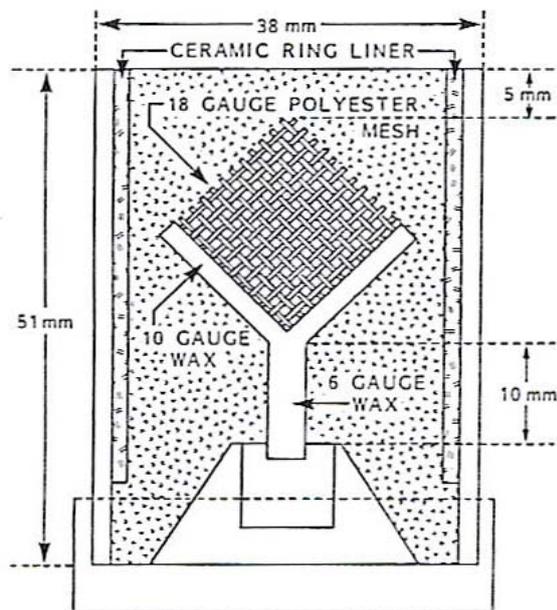


Abb. 3.10: Prüfkörper nach WHITLOCK, 1981 [49]

Angelehnt an die Prüfkörperform von EDEN, DICKSON (NBS Modell) bildet hier ein quadratisches Polyesternetz mit Einzelsträngen von 18 Gauge (= 1,1 mm) im Durchmesser die Grundform des Testkörpers, der aus 10 x 10 Kästchen und 220 Segmenten besteht. An einer Ecke wird dieser senkrecht über einen Gusskanal von 10 mm Länge und 6 Gauge (= 4,11 mm) im Durchmesser an einen Gussmuldenformer fixiert. Ein Rundwachs von 10 Gauge (= 2,59 mm) im Durchmesser umschließt die rechte und linke untere Seite des Prüfkörpers.

Ein Maß für das Ausfließverhalten, die sog. „castability value (Cv)“ erhält man, indem man die ausgeflossenen Segmente exakt auszählt, durch 220 dividiert und um ein prozentuales Ergebnis zu erhalten mit 100 multipliziert.

Getestet wurden 18 aufbrennfähige Legierungen, davon 13 Nichtedelmetall- und 5 Edelmetalllegierungen mit unterschiedlichen Gewichten. Variiert wurde die Größe der Einbettmasseform sowie die Muffel- und Gießtemperatur.

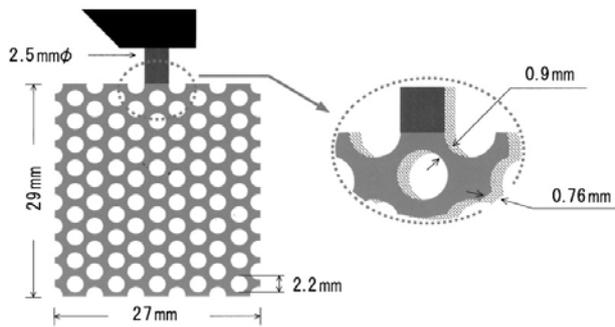


Abb. 3.11: Prüfkörper nach WATANABE, 2000/2003 [122]

Grundlage der Fließversuche war ein Wachsretentionsgitter der Größe 28 mm x 30 mm in 0,76 mm Stärke. Jeder Prüfkörper bestand aus insgesamt 77 runden Perforationen (2,2 mm im Durchmesser). Der Gusskanal hatte eine Länge von etwa 5 mm und einen Durchmesser von 10 Gauge (= 2,6 mm). Besonderheit des Prüfkörpers ist die sich verjüngende Verbindungsstelle Gusskanal – Wachsgitter (Abb. 3.11).

Überprüft in ihrer Vergießbarkeit wurden Reintitan sowie fünf Titan – Legierungen (Ti64, Ti67; 3 Titan – Kupfer – Legierungen mit 3 %, 5 % und 10 % Kupferanteil). Es wurde der Frage nachgegangen, wie sich das Ausfließverhalten der oben genannten Metalle während des Schleudergusses verhält. Abschließend wurden die so gewonnenen Prüfkörper radiologisch betrachtet, um den Fließvorgang während des Einschießens der Schmelze in die Muffel nachzuvollziehen.

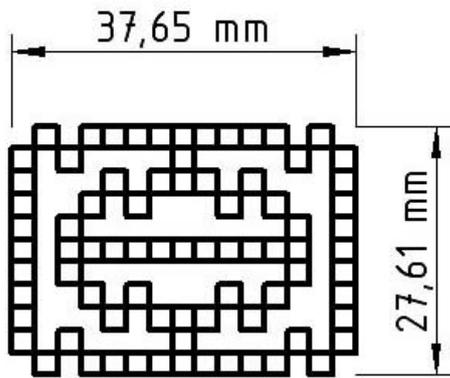
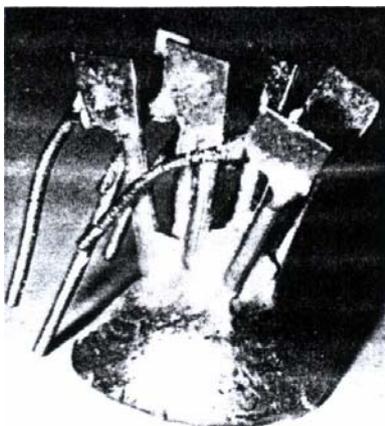


Abb. 3.12: Prüfkörper nach HÄßELBARTH, 2005 [40]

Grundlage der Fließversuche bildete ein modifiziertes rechteckiges Wachsretentionsgitter mit einer Kantenlänge von 37,65 mm x 27,61 mm. Der Prüfkörper ist über einen 3 mm starken und 1 cm langen Gusskanal am Muldenformer fixiert und nimmt in der Muffel eine horizontale Lage ein (analog der Lage eines Modellgussgerüsts) ohne dabei die Muffelränder zu berühren.

Der Prüfkörper diente dem Vergleich des Fließverhaltens der EMF – Legierung Wironit extrahart unter Verwendung 10 verschiedener Gussmaschinen mit unterschiedlichen Schmelz- und Gießverfahren.

### Prüfkörpergestalt – plattenförmig

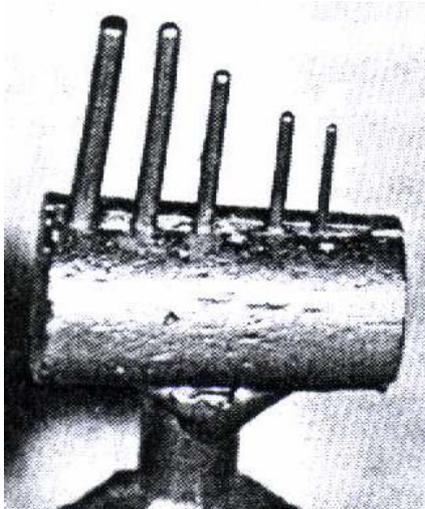


Als Grundform wurden kleine plättchenförmige Prüfkörper mit den Maßen 5 mm x 5 mm x 0,5 mm gewählt.

Untersucht wurde der Einfluss verschiedenartig angeordneter Guss-, Verteiler- und Abzugskanäle auf das Ausfließverhalten einer Nickel – Chrom – Legierung.

Abb. 3.13: Prüfkörper nach WEBER, 1981 [124]

### Prüfkörpergestalt – fadenförmige Projektionen



Als Prüfkörpergrundform dienten unterschiedlich starke Nylonfäden (6 insgesamt) mit einer Länge von etwa 5 mm, angeordnet mit zunehmendem Durchmesser, die an einem zylindrischen Wachs- zylinder befestigt wurden. Die Länge des Gusskanals betrug etwa 3 bis 3,5 mm.

Es wurden zwei Edelmetalllegierungen und drei EMF – Legierungen in ihrem Ausfließverhalten getestet.

Abb. 3.14: Prüfkörper nach VINCENT, 1977 [116]

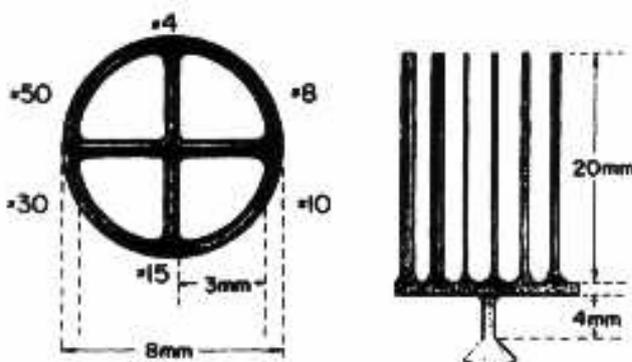


Abb. 3.15: Prüfkörper nach HOWARD, 1980 [53]

Das Prüfkörpergrundgerüst ist aufgebaut aus 14 Gauge (= 1,63 mm) starkem rundem Gusskanalwachsdraht und Nylonfäden unterschiedlichen Durchmessers. Ein 4 mm langer senkrecht verlaufender Gusskanal ist an einem konischen Muldenformer fixiert. Vom Gusskanalende aus verlaufen in einem 90° Winkel (horizontal), vier 14 Gauge starke Speichen mit einer Länge von jeweils 3 mm. Die Speichen werden kreisförmig von 14 Gauge starkem Gusskanalwachs gefasst. Nylonfäden mit 6 verschiedenen Stärken und jeweils 20 mm Länge sind kreisförmig auf dem Wachsring in einem 90°

Winkel zur Ringebene angeordnet. Jede Fadenstärke entspricht einem festgelegten Oberflächen – Volumen – Verhältnis.

Es wurden fünf goldreduzierte Legierungen, sieben aufbrennfähige goldreduzierte Legierungen und eine Kontrolllegierung (goldreduzierte Gusslegierung mit 62 % Gold-Typ III nach A.D.A. -) quantitativ in ihrem Ausfließverhalten verglichen.

### Prüfkörpergestalt – scheibenförmig

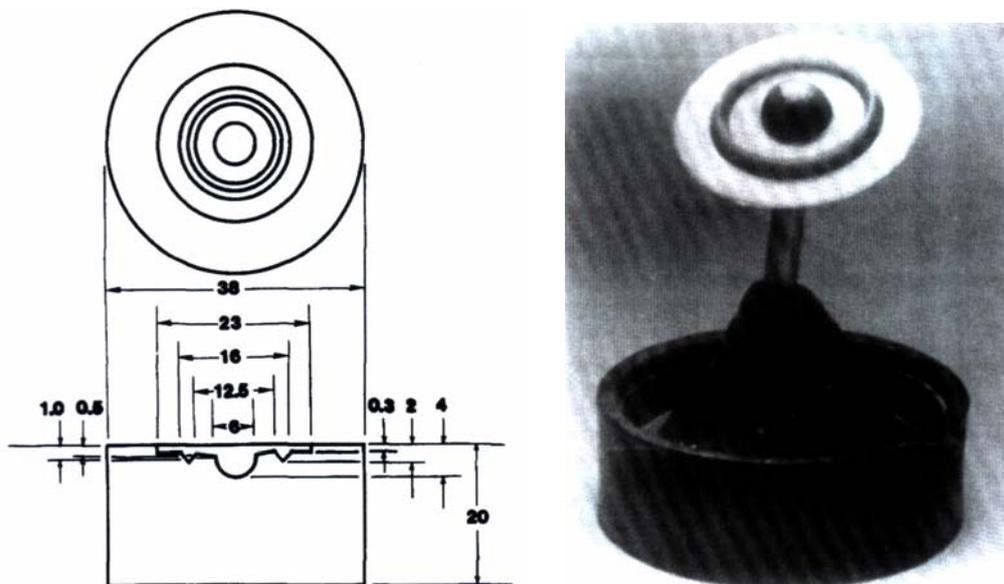


Abb. 3.16: Prüfkörper nach ASGAR, 1977 [4]

ASGAR und ARFAEI entwickelten 1977 einen aus Wachs bestehenden scheibenförmigen Prüfkörper. Dieser hatte ein Profil, das wie auch zahntechnische Restaurationen aus dünneren und dickeren Abschnitten besteht.

Angestiftet an einen Muffelsockler wurde dieser über einen zentralen, hohlen Metallgussstift (Länge von etwa 10 mm, Durchmesser etwa 12 Gauge = 2,64 mm).

Ziel der Studie war die Bewertung und der Vergleich der Fließfähigkeit vier verschiedener Legierungen (NEM – Basislegierung, zwei hochschmelzende Edelmetalllegierungen sowie eine Goldlegierung) in Abhängigkeit von fünf verschiedenen Gießmethoden.

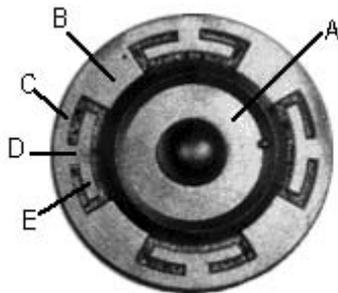


Abb. 3.17 : Prüfkörper nach MEYER, BARRAUD und SUSZ, 1983 [108]

Der MBS – Test wurde 1983 von J.M. MEYER, R. BARRAUD und C. SUSZ entwickelt, wobei der Prüfkörper auf der Vorlage von ASGAR basiert.

Das MBS – Modell hat eine scheibenförmige Gestalt, aus Kunststoff bestehend, mit einem Durchmesser von 24 mm und einer Materialstärke von 0,4 – 4,1 mm, wobei man einen Innen- und Außenbereich unterscheidet. Der Außenbereich ist durch 4 Durchbrüche modifiziert, wodurch 4 T – förmige Vorsprünge erzeugt werden. Somit erhält man 5 verschiedene Zonen (Abb. 3.17) in unterschiedlicher Anzahl (1x Zone A, 4x Zonen B, 8x Zonen C, 4x Zonen D, 8x Zonen E). In der Summe sind es maximal 25 Berechnungszonen. Man erhält den Index des Fließvermögens IC (Index of castability) einer zu untersuchenden Legierung in Prozent, indem man die Anzahl der vollständig ausgeflossenen Zonen mit 4 multipliziert.

Untersucht in ihrem Fließvermögen wurden insgesamt 19 Dentallegierungen, davon fünf Edelmetalllegierungen, acht Legierungen auf Nickelbasis und sechs auf Titanbasis unter Verwendung von drei verschiedenen Schmelztechniken, vergossen mit zwei verschiedenen Gussanlagen.

### Prüfkörpergestalt – simulierte Kronen

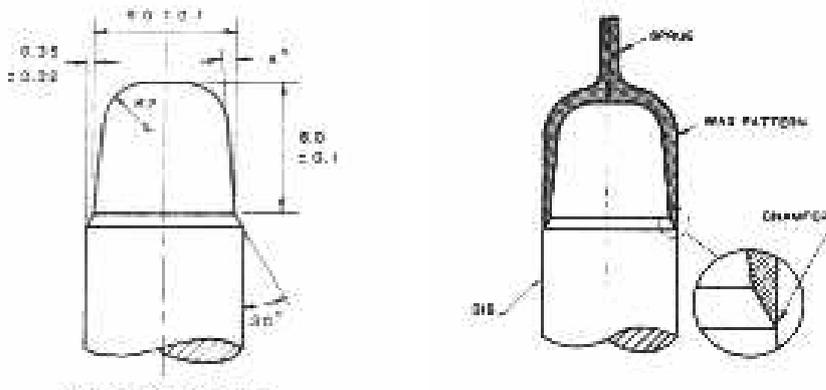


Abb. 3.18: Prüfkörper nach BROCKHURST, 1983 [22]

Versuchsgrundlage bildete eine Vollkrone, die auf einem maschinell gefertigten zylindrischen Stumpfmodell (Abb. 3.18 links) vorerst in Wachs geformt (Abb. 3.18 rechts) und später dann in Metall überführt wurde. Die Wanddicke beträgt 0,35 mm, der zervikale Kronenrand hat eine Länge von 18 mm.

Neunzehn Legierungen, davon vier EMF – Legierungen wurden mittels zweier Gießmethoden (Vakuum – Druckguss, Schleuderguss) getestet.

### Prüfkörpergestalt – klingenförmig

Die Literaturdurchsicht ergab keine Abbildung der von MOFFA et al. (1975) und ENAMES (1978) verwendeten klingenförmigen Prüfkörpergestalt. Beschrieben wird eine Allzweckmesser Klinge No. 1992 der Firma Stanley.

MOFFA et al. untersuchten das Fließvermögen von fünf Legierungen (drei Goldbasis – und zwei Silberbasislegierungen) unterschiedlicher Dichte in Abhängigkeit von der Gießmethode (drei Vakuum – Druckgussgeräte, eine Schleudergussapparatur). Qualitative Ergebnisse wurden mittels eines Elektronenmikroskops verifiziert [34].

## Prüfkörpergestalt – Kombination verschiedener Formen

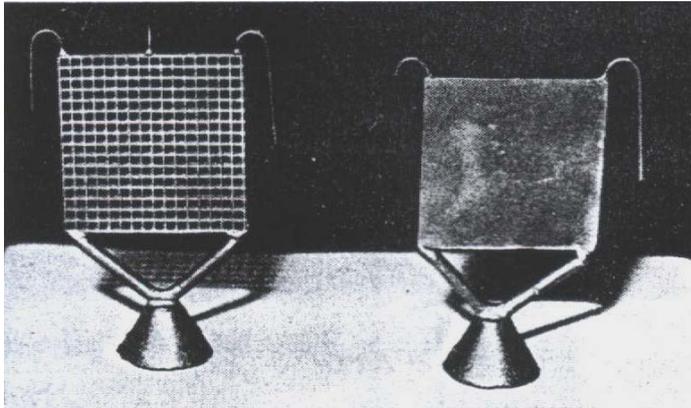
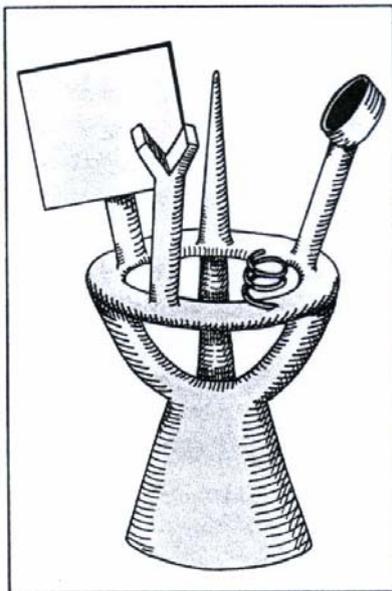


Abb. 3.19: Prüfkörper nach WEBER, 1979 [125]

Als Formen kamen 0,4 mm starke, solide Wachsplatten mit einer Kantenlänge von 40 mm sowie 0,5 mm starke Wachsretentionsgitter mit einer Kantenlänge von 40 mm zur Anwendung. Die Guss- bzw. Abzugskanäle wurden an die ISO [58] angelehnt.

Vergossen wurden eine Goldlegierung und zwei Nickel – Chrom – Legierungen.



Grundbestandteil aller Prüfkörper war ein Ring aus 4 mm starkem Wachsdraht und 15 mm im Durchmesser. An diesen Ring wurden jeweils ein zweiflächiges Inlay, eine tiefgezogene Kappe, ein verjüngendes Klammerprofil, eine Wachsspirale und eine Wachsplatte angeschmolzen.

Die Versuche zum Fließvermögen beruhten auf der Testung zweier Edelmetall – Legierungen und zweier Nickel – Chrom – Legierungen unter Berücksichtigung zweier Gießmethoden.

Abb. 3.20: Prüfkörper nach SAUER, 1982 [93]

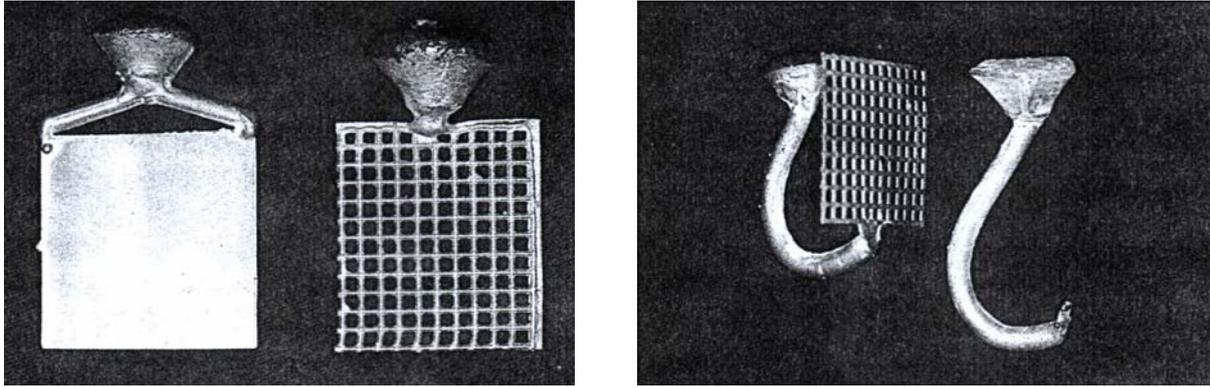


Abb. 3.21: Prüfkörper nach HARASZTHY und WEBER, 1983 [126]

WEBER und HARASZTHY verwendeten netzförmige und plattenförmige Wachsprüfgitter mit den Abmaßen 30 mm x 30 mm x 0,4 mm.

Untersucht wurde die Vergießbarkeit einer EMF – Legierung (Wiron 77) und zweier edelmetallreduzierter Legierungen (Bego Rex, Bego Star) in Abhängigkeit vom verwendeten Gießverfahren und Länge, Anordnung des Gusskanals.



Abb. 3.22: Prüfkörper nach BERNSDORFF, 1991 [18]

Als Gussobjekt diente ein zylindrischer Hohlkörper aus Gelatine, der einseitig mit einem halbkugeligen Boden verschlossen wurde. Die Wandstärke betrug durchgehend 0,15 mm. Die Abbildung 3.22 zeigt den Prüfkörper in einer Gipsschablone als Anstifthilfe. Ein 2,2 mm starker und 20 mm langer Wachsdraht diente als Gusskanal. Paarweise wurden die Prüfkörper divergierend auf einem Muffelsockler fixiert.

Das Fließverhalten von sechs Palladium – Kupfer – Legierungen, fünf Palladium – Silber – Legierungen und einer Gold – Silber – Legierung wurde in Abhängigkeit

variabler Vorwärm- und Gießtemperaturen sowie der Verwendung zweier unterschiedlicher Einbettmassen überprüft.

### 3.2.5 Vergleich der Prüfkörper – Testverfahren

Schwierig ist die Vergleichbarkeit der Prüfkörperformen bzw. Testverfahren, da entweder zu viele unterschiedliche Parameter gleichzeitig betrachtet werden oder die Versuche nicht reproduzierbar sind. Deshalb werden im Folgenden nur grundlegend angewandte Prüfkörperformen beurteilt und miteinander verglichen.

Die *Plattenform* stellt einen sehr schwierig zu gießenden Prüfkörper dar, da das Oberflächen – Volumen – Verhältnis sehr groß ist. Vorausgesetzt sämtliche einflussnehmenden Größen sind aufeinander abgestimmt, kann ein vollständiger Guss entstehen. Das Ergebnis kann nur nach dem Alles – oder – Nichts – Prinzip (vollständiger oder unvollständiger Guss) beurteilt werden [125].

Die *Netzform* hat den Vorteil, dass zum einen die Ergebnisse prozentual angegeben werden können und einfacher messbar sind und zum anderen daraus folgernd der Einfluss einzelner die Gussquantität bestimmender Faktoren gemessen werden kann [1, 113, 115, 125]. Besonders sensitiv ist diese Prüfkörpergestalt gegenüber dem Design des Gusskanals [113]. Der Test nach WHITLOCK hat jedoch die Schwäche, dass das Fließverhalten verschiedenster Legierungen unter variierenden Gießbedingungen nicht deutlich darstellbar ist, da die Gitter immer zu 90 % ausflossen [72].

Die *Spiralform* als Versuchsobjekt ist sehr fragwürdig. Durch ungünstige Bewegungsverhältnisse beim Guss entstehen zum Teil negative Beschleunigungen der Schmelze innerhalb der Spirale, die ein Ausfließen der Form erschweren oder sogar behindern. Dies beweisen auch die Versuchsergebnisse von SAUER, wo trotz höherem spezifischem Volumen der Spirale und dadurch längerer Erstarrungszeit der Spirale, die Gussergebnisse gegenüber der Platte um ca. 44 % niedriger ausfielen (prozentualer Ausfluss der Platten ca. 60 %; prozentualer Ausfluss der Spiralen ca. 16 %) [7].

Das *MBS – System* weist einige Vorteile, aber auch Nachteile auf. Die spezielle Form des MBS – Modells mit dünneren und dickeren Anteilen und Durchbrüchen gleicht annähernd den Strukturen, die die Legierungsschmelze während des Gusses von Kronen- und Brückengerüsten zurücklegen muss (auch Vorteil der von ASGAR und ARFEI entwickelten Prüfkörperform). Mittels des Testes können der Einfluss von

Legierungszusammensetzung (hauptsächlich der Vergleich hochgold- und goldreduzierter Legierungen [70]) und Veränderung thermischer Parameter wie Muffeltemperatur und Temperatur der zu vergießenden Legierung bezüglich des Fließvermögens überprüft werden. Eine vergleichbare Auswertbarkeit der Versuchsergebnisse durch Angabe des Index des Fließvermögens IC in Prozent ist möglich. Problematisch ist die relativ schwierige Herstellbarkeit und leichte Verformbarkeit (Transportschaden) der MBS - Scheibe [108].

Mit einem *keilförmigen Prüfkörper* kann die Abhängigkeit der Oberflächenspannung, der Metaldichte sowie der Vorwärm- und Gießtemperatur von der Detailwiedergabe der Prüfkörperländer gezeigt werden [76]. Des Weiteren zeigen sich höhere Ausfließwerte sowie eine höhere Reproduzierbarkeit bei einem hohen Gießdruck als bei der Verwendung einer netzförmigen Gestalt [113].

THOMSON weist darauf hin, dass es bei dem Prüfkörper nach VINCENT zu Turbulenzen in der Schmelze der Goldlegierung am Prüfkörperende kommt, wodurch der Nylonfaden mit dem schmalsten Durchmesser am Ende des Zylinders nicht vollständig ausfließt. THOMPSON gibt daher einer runden Prüfkörperform (er verwendete eine Wachsscheibe, auf dem Nylonfäden im symmetrischen Abstand voneinander kreisförmig angeordnet sind) den Vorzug [112].

ASGAR weist darauf hin, dass sich das Volumen – Oberflächen – Verhältnis vieler verschieden gestalteter Prüfkörperformen stark von dem in der Zahntechnik herzustellenden Metallgerüsten für Kronen- und Brückenzahnersatz unterscheidet [3]. Gleiches gilt auch für den Weg, den das Metall zurücklegen muss, um den Prüfkörper bzw. die Krone vollständig auszufüllen. Hier gibt es deutliche Unterschiede im Metallfluss [115].

Die Erstarrungszeit einer Legierung ist abhängig vom Volumen – Oberflächen – Verhältnis der zu gießenden Form und beeinflusst somit die Fließfähigkeit und Porosität einer Legierung [54].

## 4 Material und Methode

### 4.1 Verwendete Materialien

Im Rahmen des Ausfließversuchs wurden aus sechs EMF – Legierungen der Firma BEGO insgesamt 180 Prüfgitter im Vakuum – Druckgussverfahren hergestellt.

#### 4.1.1 EMF – Legierungen

Es wurden drei nicht aufbrennfähige und drei aufbrennfähige EMF – Legierungen in ihrem Ausfließverhalten getestet. Die folgende Tabelle 4.1 zeigt die verwendeten Legierungen, ergänzt durch die jeweilige Chargennummer.

	<b>Legierung</b>	<b>Charge</b>
<b>Nicht aufbrennfähige EMF – Legierungen (Modellgusslegierungen)</b>	Wironit	11916
	Wironit LA	11936
	Wironium Plus	11917
<b>Aufbrennfähige EMF – Legierungen</b>	Wirobond C	2506
	Wirobond LFC	11745
	Wiron 99	2546

Tab. 4.1: Verwendete EMF – Legierungen mit jeweiliger Chargennummer

##### 4.1.1.1 Modellgusslegierungen

Untersucht wurden WIRONIT, WIRONIT LA sowie WIRONIUM PLUS. Deren chemische Zusammensetzung und mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 4.2 sowie Tabelle 4.3 zusammenfassend gegenübergestellt.

Legierungsbestandteil	Wironit	Wironit LA	Wironium Plus
Kobalt	64	63,50	62,50
Chrom	28,65	29	29,53
Molybdän	5	5	5
Silizium	1	1,20	< 2
Mangan	1	0,60	< 2
Kohlenstoff	0,35	0,25	max. 0,17
Eisen	-	-	-
Stickstoff	-	0,25	< 2
Tantal	-	0,20	0,20

Tab.4.2: Chemische Zusammensetzung von WIRONIT, WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS gemäß Herstellerangaben, angegeben in Masseprozent [9, 10,11]

Größe [Einheit]	Wironit	Wironit LA	Wironium Plus
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	8,2	8,2	8,4
Vickershärte (HV 10)	350	360	340
Elastizitätsmodul [GPa]	211	220	220
Dehngrenze (R <sub>p0,2</sub> ) [MPa]	600	640	700
Zugfestigkeit (R <sub>m</sub> ) [MPa]	880	940	1000
Bruchdehnung [%]	6,2	8	10
Vorwärmtemperatur [°C]	950-1050	950-1050	950-1050
Schmelzintervall [°C]	1320-1350	1300-1340	1310-1345
Solidustemperatur [°C]	1320	1300	1310
Liquidustemperatur [°C]	1350	1340	1345
Gießtemperatur [°C]	1460	1450	1440

Tab. 4.3: Mechanische Eigenschaften von WIRONIT, WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS gemäß Herstellerangaben; grau hinterlegte Werte sind für die Gießversuche relevant [9, 10, 11]

WIRONIT, WIRONIT LA und WIRONIUM PLUS zeichnen sich durch eine höhere Festigkeit (Vickershärte 340-360) sowie einem doppelt so hohem Elastizitätsmodul (210-220 GPa) gegenüber Edelmetalllegierungen aus. Dies begründet die bevorzugte Anwendung in der Teil- und Kombinationsprothetik zur Herstellung von Modellguss – Grundgerüsten [68].

#### 4.1.1.2 EMF – Aufbrennlegierungen

Neben den nicht aufbrennfähigen EMF – Legierungen wurden zusätzlich WIROBOND C, WIROBOND LFC und WIRON 99 in ihrem Ausfließverhalten untersucht. Die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften der obigen Legierungen sind der Tabelle 4.4 sowie Tabelle 4.5 zu entnehmen.

Legierungsbestandteil	Wirobond C	Wirobond LFC	Wiron 99
Kobalt	61	33	-
Chrom	26	30	22,5
Molybdän	6	5	9,5
Silizium	1	1	1
Mangan	-	1,5	-
Kohlenstoff	Max. 0,02	0,3	max. 0,02
Eisen	0,5	29	0,5
Stickstoff	-	0,2	-
Nickel	-	-	65
Wolfram	5	-	-
Niob	-	-	1
Cer	0,5	-	0,5

Tab. 4.4: Chemische Zusammensetzung von WIROBOND C, WIROBOND LFC, WIRON 99 gemäß Herstellerangaben, angegeben in Masseprozent [12, 13,14]

Größe [Einheit]	Wirobond C	Wirobond LFC	Wiron 99
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	8,5	8,2	8,2
Vickershärte (HV 10)	310	315	180
Elastizitätsmodul [GPa]	210	200	205
Dehngrenze (R <sub>p0,2</sub> ) [MPa]	480	660	330
Bruchdehnung [%]	6	11	25
Zugfestigkeit R <sub>m</sub> [MPa]	720	950	650
WAK [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ] 20-600°C	14,2	16,1	14,0
25-500°C	14,0	15,9	13,8
Vorwärmtemperatur [°C]	900	900	900
Schmelzintervall [°C]	1270-1380	1280-1350	1250-1310
Solidustemperatur [°C]	1270	1280	1250
Liquidustemperatur [°C]	1380	1350	1310
Gießtemperatur [°C]	1500	1480	1450

Tab. 4.5: Mechanische Eigenschaften von WIROBOND C, WIROBOND LFC, WIRON 99 gemäß Herstellerangaben; grau hinterlegte Werte sind für die Gießversuche relevant [12, 13,14]

WIROBOND C, WIROBOND LFC und WIRON 99 sind nicht aufbrennfähige EMF – Legierungen, wobei Wiron 99 den Nickellegierungen aufgrund des hohen Nickelanteils zugeordnet wird. Durch Modifikation der Legierungszusammensetzung werden größere Schmelzintervalle, höhere Zugfestigkeitswerte im Vergleich zu Edelmetalllegierungen erreicht, was eine Verblendung von Kronen- und Brückengerüsten erst ermöglicht. Hohe Festigkeitswerte lassen im Vergleich zu den weicheren Legierungen auf Edelmetallbasis eine grazilere Gerüstgestaltung zu [104].

#### 4.1.2 Verwendete Einbettmassen

Prüfkörper aus WIRONIT, WIRONIT LA und WIRONIUM PLUS:

- Verwendung der phosphatgebundenen Spezialeinbettmasse für Modellgusslegierungen WIROVEST® mit der dazugehörigen Anmischflüssigkeit BEGOSOL® 80 %ig (Charge: 07628) der Firma BEGO

Prüfkörper aus WIROBOND C, WIROBOND LFC und WIRON 99:

- Verwendung der phosphatgebundenen Präzisionseinbettmasse für Kronen und Brücken BELLAVEST® SH mit dem dazugehörigen Liquid BEGOSOL® HE 40 %ig (Charge: 09620) der Firma BEGO

#### 4.1.3 Wachs

Der Prüfkörper basiert auf der Grundlage eines Wachsretentionsgitters mit quadratischen Retentionen. Zum Anstiften des Prüfkörpers an den Muffelsockel wurde Anstiftdrahtwachs mit einem Durchmesser von 3 mm verwendet. Die folgende Abbildung zeigt ein standardisiertes Wachsretentionsgitter der Firma BEGO.

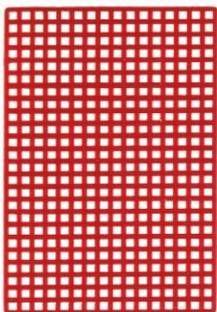


Abb. 4.1: standardisiertes Wachsretentionsgitter

## 4.2 Geräte

### 4.2.1 Nautilus CC

Bei der Gießmaschine NAUTILUS CC (Cast Controll; Gerätenummer: 301 334) handelt es um eine Hochleistungs – Vakuum – Druckgussmaschine der Firma BEGO, die über eine Induktionsheizung Dentallegierungen zum Schmelzen bringt.

Vergossen werden können alle handelsüblichen Dentallegierungen mit Ausnahme des Titans, welches aufgrund seiner Reaktionsfreudigkeit eine spezielle Gießvorrichtung benötigt [37].

Über folgende herausragende Merkmale verfügt die NAUTILUS CC [15]:

- Temperaturmess-System steuert den Guss mit Hilfe eines sogenannten Mehrkanalpyrometers
- Automatische Gießzeitpunkterkennung
- Vollautomatisches oder manuelles Gießen ist möglich
- Bewährtes Hubtiegelkonzept, welches ein optimales Ausfließen der Schmelze ermöglicht
- Gespeicherte Gießprogramme (für BEGO – Legierungen) mit Modifikation für Dentallegierungen anderer Hersteller
- Software 1.13 mit Injektorsteuerung
- Programmführung mehrsprachig

### 4.2.2 Zusätzliche Geräte

- Gussmuffeln: aus Metall, Größe „3“
- Fließpapiereinlagen
- Gussmuldenformer siehe Abbildung 4.4
- Dosiergerät: Wassermann Dental-Maschinen Typ DSW-2K
- Vakuumanmischgerät: Easymix
- Vorwärmofen: Miditherm 200 MP
- Abstrahlgerät: Duostar F1
- Schnellschleifer: Nonstop SL

**4.3 Methode**

**4.3.1 Prüfkörperherstellung**

Im folgenden Fließdiagramm der Abbildung 4.2 werden alle Arbeitsschritte vom standardisierten Wachsretentionsgitter zum fertigen Prüfkörper schematisch dargestellt und anschließend erläutert.

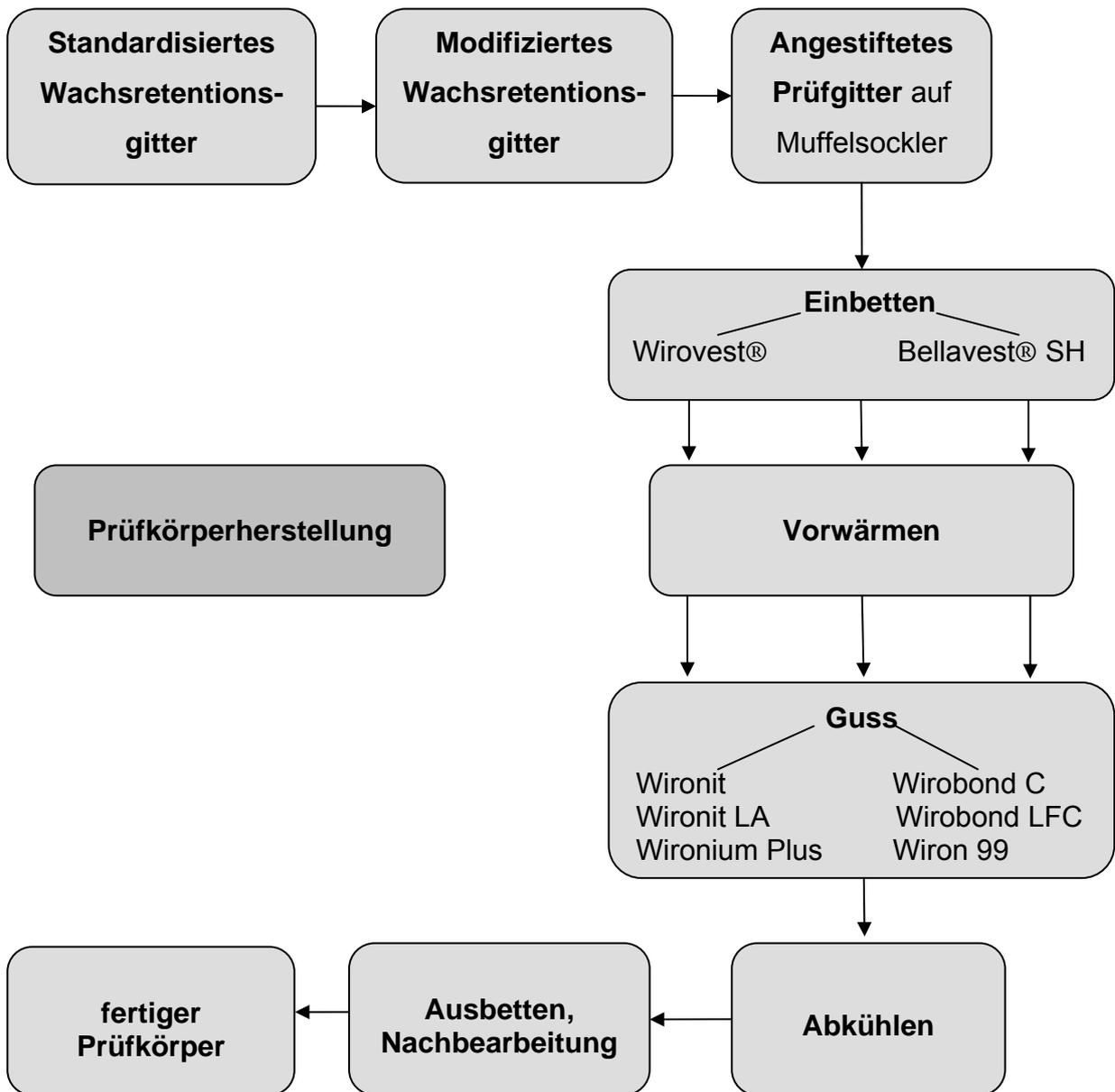


Abb. 4.2: Fließdiagramm der Arbeitsschritte zur Herstellung der Prüfkörper

Für den Ausfließversuch wurden für jede Serie der sechs EMF – Legierungen jeweils sechs Prüfgitter aus einem standardisierten Wachsretentionsgitter (Abb. 4.1) geschnitten. Die folgende Abbildung 4.3 zeigt den vorbereiteten Prüfkörper in Wachs, dessen Form von HÄßELBARTH entwickelt wurde [40].

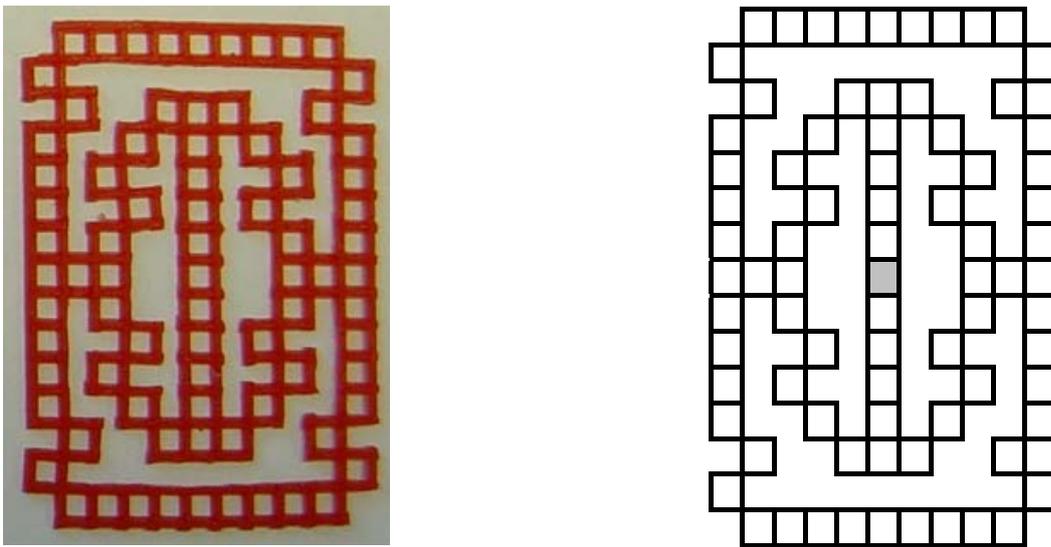


Abb. 4.3: Links: Prüfkörperform in Wachs; Rechts: Schema des Prüfkörpers

Das Prüfgitter besteht aus insgesamt 79 Kästchen mit einer Kantenlänge von etwa 38,5 mm x 28,1 mm ( $\pm 0,5$  mm). Ein quadratisches Kästchen hat eine Kantenlänge von 0,25 mm ( $\pm 0,05$  mm).

Die fertig geschnittenen Wachsgitter wurden aufgrund der Temperaturanfälligkeit des Wachses im Kühlschrank gelagert, um innere Spannungen und Verzerrungen des Wachses zu vermeiden. An vier aufeinander folgenden Tagen wurden 180 vorbereitete Wachsgitter in Metall überführt. Dazu wurden zunächst die Gitter, mit 1 cm langem Wachsdraht und 3 mm im Durchmesser, jeweils an einen BEGO – Gussmuldenformer der Größe „3“ mit Hilfe von Gusskanalwachs fixiert. Es war darauf zu achten, dass der Wachsdraht mittig am Gitter befestigt wird und sich zum Trichter des Muldenformers hin nicht verjüngt, um ein späteres gleichmäßiges Einschießen der Schmelze zu gewährleisten. Die Prüfgitter wurden senkrecht zur Fließrichtung, horizontal in der stehenden Muffel ausgerichtet (Abbildung 4.4).



Abb.4.4: Links: Draufsicht Wachsgitter; Rechts: Seitenansicht angestiftetes Wachsgitter

Auf den Gussmuldenformer wurde jeweils ein Metall – Muffelring der Größe „3“ gesteckt, der zuvor mit einem angefeuchteten BEGO – Vlies – Einlegestreifen ausgekleidet wurde. Die Fließeinlage soll die Expansion der Einbettmasse gewährleisten. Der Prüfkörper wurde so positioniert, dass dieser vom Muffelrand sowie von deren Oberkante einen mindestens 5 mm großen Abstand hat. Mit der phosphatgebundenen Spezialeinbettmasse WIROVEST®, exakt abgewogen mittels dem Dosiergerät WASSERMANN DENTAL – MASCHINEN TYP DSW – 2K (BEGO, Bremen, Deutschland) und unter Vakuum angemischt mit 80 %igem Liquid BEGOSOL® und destilliertem Wasser (Rührgerät Easymix), wurde serienweise (sechs Muffeln), in der Summe 90 Muffeln auf dem Rüttler auf niedrigster Rüttelstufe befüllt. Die restlichen 90 Prüfgitter wurden gemäß den Angaben des Herstellers mit der Präzisionseinbettmasse BELLAVEST® SH (shock heat) mit der dazugehörigen Anmischflüssigkeit BEGOSOL® HE 40 %ig (high expansion) der Firma BEGO und destilliertem Wasser eingebettet. Nach einer halbstündigen Abbindezeit wurde der Vorwärmofen MIDITHERM 200 MP (BEGO, Bremen, Deutschland) serienweise mit den Muffeln bestückt, diese dann gemäß Herstellerangaben vorschriftsgemäß sowie bei variierenden Vorwärmtemperaturen erwärmt (Kapitel 4.3.2). Der Guss erfolgte in der NAUTILUS CC (BEGO, Bremen, Deutschland), wobei pro Muffel zwei Gusszylinder à 6 g unter veränderten Gießbedingungen vergossen wurden. Nachdem die Muffeln bei Raumtemperatur abgekühlt waren, wurde der Muffelring entfernt und der hergestellte Prüfkörper mit Hilfe einer Ausbettzange vorsichtig von der Einbettmasse befreit. Nach Abstrahlen der Einbettmassereste mit dem Abstrahlgerät DUOSTAR F1 (BEGO,

Bremen, Deutschland) bei 4 bar, erfolgte das vorsichtige Abtrennen der Gusskanäle mit dem Schnellschleifer NONSTOP SL (BEGO, Bremen, Deutschland). Um einen Überblick über die Serien zu behalten, wurden sofort nach Fertigstellung der Prüfkörper diese sorgfältig serienweise mit Angabe der Vorwärm- und Gießtemperatur verpackt.

Nach Beendigung des Ausfließversuchs begann dessen Auswertung. Dabei wurden zunächst die Kästchen der Prüfgitter serienweise exakt ausgezählt und sorgfältig tabellarisch protokolliert und später ergänzt durch die Parameter der deskriptiven Messwertstatistik (Anhang 9). Nur vollständig ausgeflossene Kästchen wurden in die Bewertung mit einbezogen.

### 4.3.2 Versuchsdurchführung

Die folgende Abbildung 4.5 stellt den Versuchsablauf im Überblick dar.

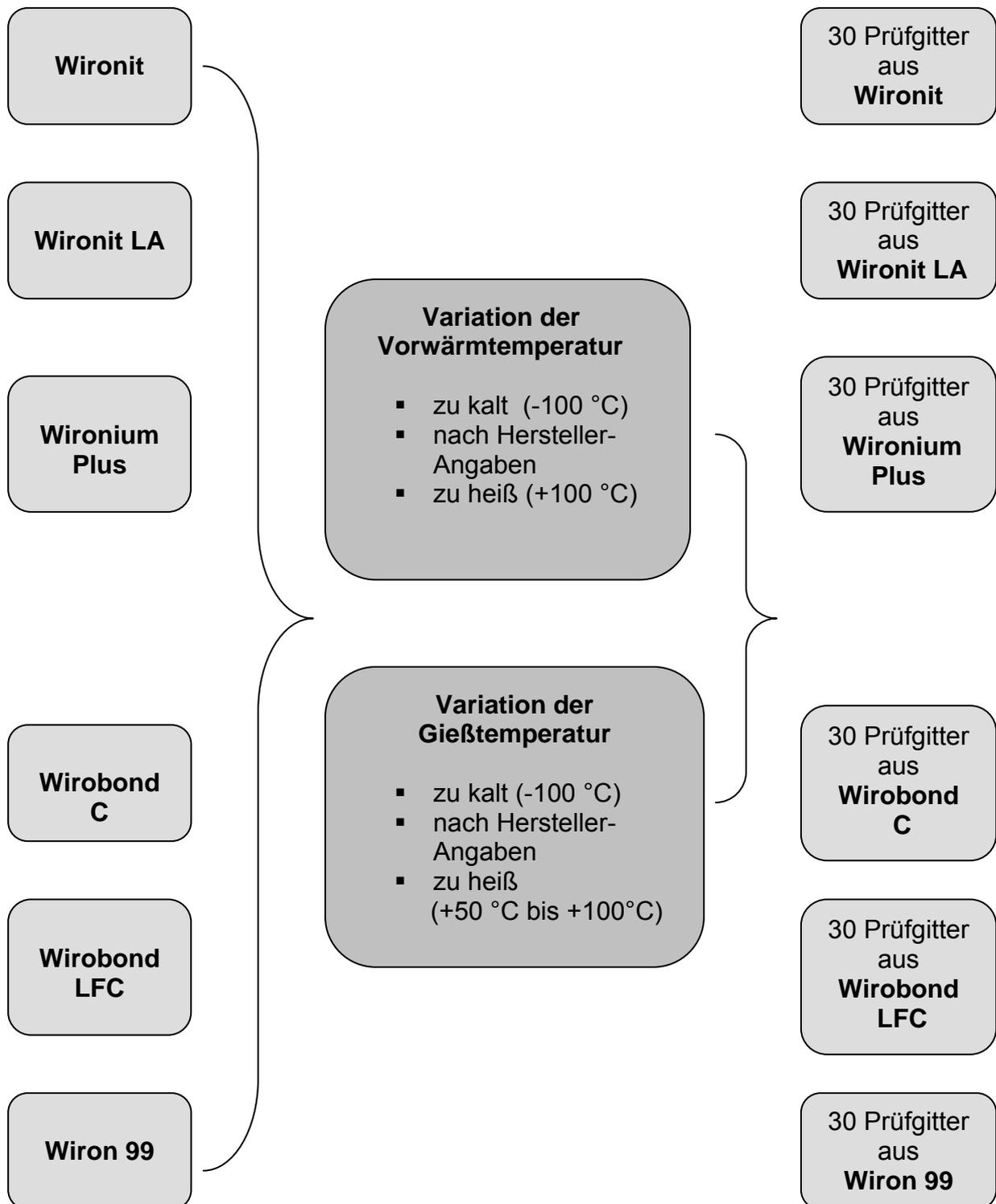


Abb. 4.5: Schema des Versuchsablaufs

Die Dentallegierungen WIRONIT, WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS sowie WIROBOND C, WIROBOND LFC, WIRON 99 (BEGO, Bremen, Deutschland) wurden unter Variation der Vorwärm- und Gießtemperatur wie in Abbildung 4.5 dargestellt, vergossen. In fünf Serien à sechs Prüfgitter entstanden für jede der oben genannten Legierungen 30 Prüfkörper.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Allgemeines

Die Ergebnisse des Ausfließversuchs der sechs zu untersuchenden EMF – Legierungen werden im Folgenden in Prozentwerten angegeben. Grundlage dieser Untersuchung bildet der unter Kapitel 4.3.1 dargestellte Prüfkörper, in Form eines modifizierten Wachsretentionsgitters, welcher aus insgesamt 79 Kästchen besteht und bei vollständiger Wiedergabe der Grundform einer Formfüllung von 100 Prozent entspricht. Dabei werden nur komplett ausgeformte Kästchen in die Bewertung mit einbezogen. Nach sorgfältiger Auszählung der Prüfgitter wurde für jede Prüfkörpergruppe, bestehend aus sechs Güssen, anhand der Einzelergebnisse eine Messwertstatistik erstellt, die sich aus dem arithmetischen Mittelwert, Medianwert, Minimum, Maximum, der Standardabweichung sowie dem Variationskoeffizienten zusammensetzt. Auf Erläuterungen zu den einzelnen statistischen Parametern soll hier verzichtet werden. Deren Definitionen sind in der entsprechenden Fachliteratur der Statistik zu finden [83]. Die Einzelergebnisse der Serien sind im Anhang 9 fotografisch und tabellarisch dokumentiert.

In den folgenden zusammenfassenden Tabellen und Grafiken wird zunächst jede Legierung für sich betrachtet. Mittels eines Balkendiagramms werden die Ergebnisse veranschaulicht. Die x – Achse gibt dabei den entsprechend veränderten gießtechnologischen Parameter (Vorwärm- bzw. Gießtemperatur in Grad Celsius) an und die y – Achse den Prozentwert des ausgeflossenen Gitters mit der entsprechenden Standardabweichung.

Zur Überprüfung statistischer Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Serien kommt der t – Test nach Student zur Anwendung [83], deren Werte über die Statistikfunktion im Programm Excel ermittelt wurden. Der Test dient dazu, zwei Mittelwerte aus zwei verschiedenen Stichproben miteinander zu vergleichen. Es wird dabei der Frage nachgegangen, ob innerhalb der Stichprobenbeobachtungen zwei Mittelwerte in der Grundgesamtheit voneinander verschieden sind. Voraussetzung ist, dass sich alle Ergebnisse innerhalb einer Normalverteilung befinden. Dies trifft hier zu, da das Verhältnis arithmetischer Mittelwert und Median annähernd gleich 1 ist. Es wird ein Signifikanzniveau von  $p= 0,05$  (5 % Signifikanz) festgelegt. Ist der errechnete Wert der beiden zu vergleichenden Mittelwerte zweier unabhängiger Stichproben  $\geq 0,05$

( $\geq 5\%$ ), so gelten die beiden Mittelwerte als statistisch nicht signifikant unterschiedlich. Ab einer Wahrscheinlichkeit  $< 0,05$  ( $\leq 5\%$ ) sind die beiden Mittelwerte als signifikant unterschiedlich anzusehen. Die Werte sind der entsprechenden Kreuztabelle zu entnehmen. Dabei gelten „fett“ markierte und n.s. bezeichnete Werte als statistisch nicht signifikant unterschiedlich, wogegen die nicht hervorgehobenen und mit einem „\*“ versehenen Werte als statistisch signifikant unterschiedlich anzusehen sind. Da für jede Legierung nur eine Serie von sechs Prüfkörpern gemäß Herstellerangaben verarbeitet wurde, entfällt ein statistischer Vergleich der Mittelwerte, was in der jeweiligen Kreuztabelle als gestreift markierte Fläche dargestellt ist.

Im Kapitel 5.4 werden die Ergebnisse der EMF – Modellgusslegierungen tabellarisch und grafisch den EMF – Aufbrennlegierungen gegenübergestellt. Abschließend wird im Kapitel 5.5 ein Fazit gezogen.

## 5.2 Ergebnisse des Ausfließverhaltens der Modellgusslegierungen

### 5.2.1 Ergebnisse der Wironit – Serie

Wironit		Mittelwert	Minimum	Maximum	Standard-abweichung	Variations-koeffizient	
Vorwärm- temperatur	-100 °C	900 °C	25 %	23 %	27 %	1 %	2 %
	Soll	1000 °C	33 %	28 %	42 %	4 %	24 %
	+100 °C	1100 °C	36 %	25 %	43 %	6 %	50 %
Gieß- temperatur	-100 °C	1360 °C	20 %	13 %	24 %	4 %	18 %
	Soll	1460 °C	33 %	28 %	42 %	4 %	24 %
	+90 °C	1550 °C	61 %	56 %	67 %	4 %	19 %

Tab. 5.1: Ausfließverhalten von Wironit bei veränderter Vorwärm- bzw. Gießtemperatur

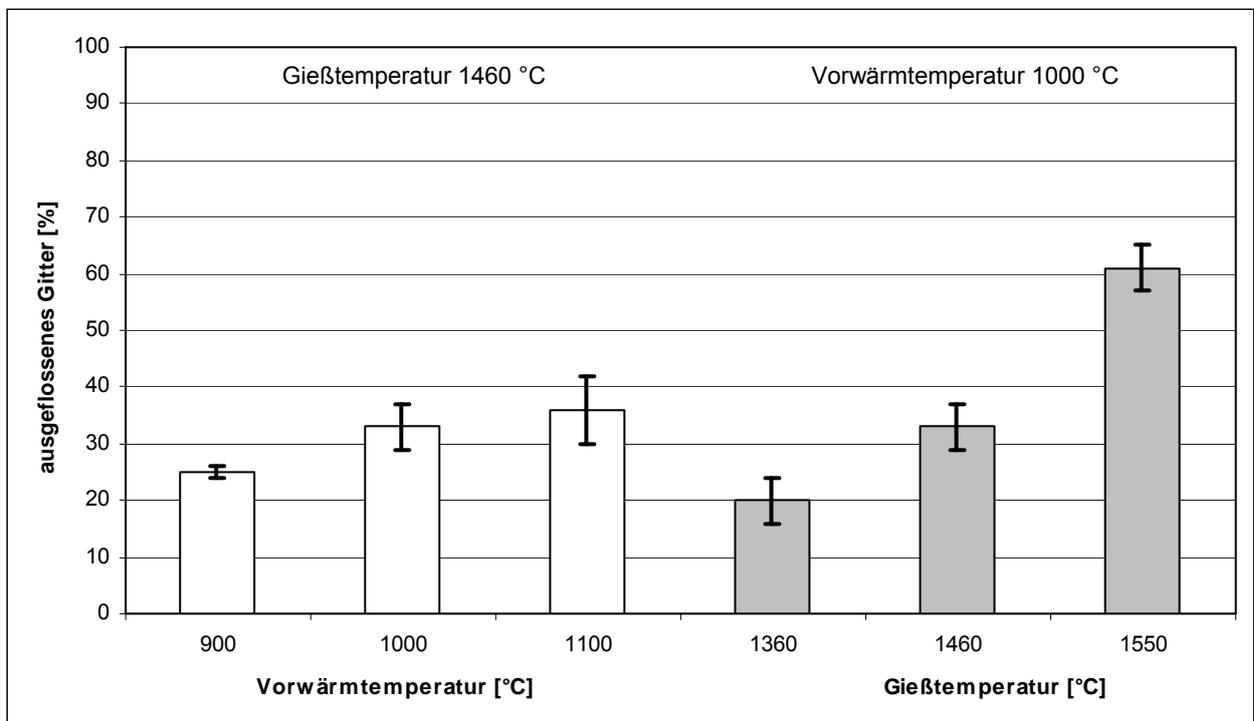


Abb. 5.1: Mittelwerte und Standardabweichungen des Ausfließverhaltens von Wironit in Abhängigkeit vom veränderten Parameter – Vorwärm- bzw. Gießtemperatur –

Das Ausfließverhalten von Wironit liegt bei einer Vorwärmtemperatur von -100 °C und einer Gießtemperatur im Sollbereich zwischen 23 % und 27 %. Der Mittelwert beträgt 25 %, die Standardabweichung 1 % und der Variationskoeffizient 2 %.

Nach Herstellerangaben verarbeitet, liegt die Formfüllung zwischen 28 % und 42 %. Der Mittelwert beträgt 33 %, die Standardabweichung 4 %, der Variationskoeffizient 24 %.

Bei einer um 100 °C erhöhten Vorwärmtemperatur wird ein Ausfließen zwischen 25 % und 43 % erzielt. Der Mittelwert beträgt 36 %, die Standardabweichung 6% und der Variationskoeffizient 50 %.

Bei einer Gießtemperaturführung -100 °C erzielt Wironit eine Formfüllung zwischen 13 % und 24 %. Der Mittelwert beträgt 20 %, die Standardabweichung 4 %, der Variationskoeffizient 18 %.

Ein Ausfließen zwischen 56 % und 67 % wird bei einer um 90 °C erhöhten Gießtemperatur erreicht. Der Mittelwert beträgt 61 %, die Standardabweichung 4 %, der Variationskoeffizient 19 %.

In der folgenden Kreuztabelle 5.2 werden die Ergebnisse der Serien des Ausfließversuchs mit Wironit statistisch miteinander verglichen.

Wironit	900 °C VT	1000 °C VT	1100 °C VT	1360 °C GT	1460 °C GT	1550 °C GT
900 °C VT		0,73 %	1,10 %	<b>5,15 %</b>	0,73 %	0,00 %
1000 °C VT	*		<b>45,50 %</b>	0,07 %		0,00 %
1100 °C VT	*	n.s.		0,16 %	<b>45,50 %</b>	0,00 %
1360 °C GT	n.s.	*	*		0,07 %	0,00 %
1460 °C GT	*		n.s.	*		0,00 %
1550 °C GT	*	*	*	*	*	

Tab. 5.2: Ergebnisse des Student T – Tests von Wironit ( VT – Vorwärmtemperatur/ GT – Gießtemperatur )

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Wironit bei Variation der Gießtemperatur ein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließverhalten aufweist. Es wird ein signifikant höheres Ausfließen bei einer Gießtemperaturerhöhung um +90 °C in Höhe von 61 % im Mittelwert erzielt. Dagegen fließt das Prüfgitter bei -100 °C Gießtemperatur signifikant geringer aus, 20 % im Mittelwert.

In der Gruppe der veränderten Vorwärmtemperatur zeigt Wironit ein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließen zwischen den Serien 900 °C VT/1000 °C VT sowie 900 °C VT/1100 °C VT. Es ist jedoch kein signifikanter Unterschied im Ausfließverhalten zwischen den Serien 1000 °C VT/1100 °C VT ersichtlich.

Beim Vergleich der Gruppen der veränderten Vorwärm- und Gießtemperatur zeigt sich, dass eine Gießtemperaturerhöhung ein statistisch signifikant höheres Ausfließen (61 % Formfüllung) zur Folge hat als eine Vorwärmtemperaturerhöhung (36 % Formfüllung). Dagegen konnten bei einer Vorwärm- sowie Gießtemperaturreduktion um -100 °C keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

### 5.2.2 Ergebnisse der Wironit LA – Serie

Wironit LA		Mittelwert	Minimum	Maximum	Standard-abweichung	Variations-koeffizient
Vorwärm-temperatur	-100 °C / 900 °C	33 %	25 %	34 %	4 %	19 %
	Soll / 1000 °C	33 %	25 %	41 %	5 %	29 %
	+100 °C / 1100 °C	49 %	38 %	57 %	6 %	48 %
Gieß-temperatur	-100 °C / 1350 °C	23 %	20 %	24 %	1 %	3 %
	Soll / 1450 °C	33 %	25 %	41 %	5 %	29 %
	+100 °C / 1550 °C	69 %	65 %	81 %	6 %	37 %

Tab. 5.3: Ausfließverhalten von Wironit LA bei veränderter Vorwärm- bzw. Gießtemperatur

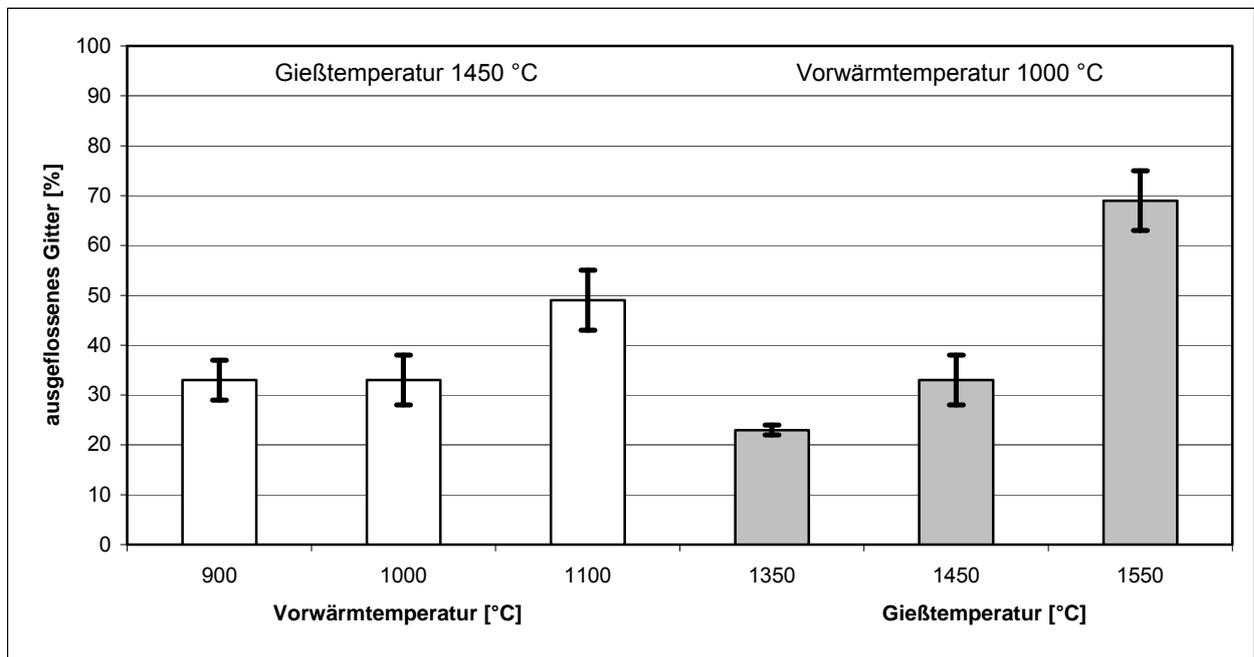


Abb. 5.2: Mittelwerte und Standardabweichungen von Wironit LA in Abhängigkeit vom veränderten Parameter – Vorwärm- bzw. Gießtemperatur –

Das Ausfließverhalten von Wironit LA liegt bei einer Vorwärmtemperatur von  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  zwischen 25 % und 34 %. Der Mittelwert beträgt 33 %, die Standardabweichung 4 % und der Variationskoeffizient 19 %.

Wird der Prüfkörper jedoch nach Herstellerangaben verarbeitet, wird eine Prüfkörperformfüllung zwischen 25 % und 41 % erzielt. Der Mittelwert beträgt 33 %, die Standardabweichung 5 %, der Variationskoeffizient 29 %.

Bei einer Erhöhung der Vorwärmtemperatur um  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  wird ein Ausfließverhalten zwischen 38 % und 57 % erreicht. Der Mittelwert beträgt 49 %, die Standardabweichung 6 % und der Variationskoeffizient 48 %.

Wird nun jedoch die Gießtemperatur um  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  reduziert, so liegt das Ausfließverhalten von Wironit LA zwischen 20 % und 24 %. Der Mittelwert beträgt 23 %, die Standardabweichung 1 %, der Variationskoeffizient 3%.

Bei einer Erhöhung der Gießtemperatur um  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  wird eine Formfüllung zwischen 65 % und 81 % erreicht. Der Mittelwert beträgt 69 %, die Standardabweichung 6 %, der Variationskoeffizient 37 %.

In der folgenden Kreuztabelle 5.4 werden die Ergebnisse der Serien des Ausfließversuchs mit Wironit LA statistisch miteinander verglichen.

Wironit LA	900 °C VT	1000 °C VT	1100 °C VT	1350 °C GT	1450 °C GT	1550 °C GT
900 °C VT		<b>47,35 %</b>	0,06 %	0,55 %	<b>47,35 %</b>	0,00 %
1000 °C VT	n.s.		0,15 %	0,53 %		0,00 %
1100 °C VT	*	*		0,02 %	0,15 %	0,03 %
1350 °C GT	*	*	*		0,53 %	0,00 %
1450 °C GT	n.s.		*	*		0,00 %
1550 °C GT	*	*	*	*	*	

Tab. 5.4: Ergebnisse des Student T – Tests für Wironit LA ( VT – Vorwärmtemperatur / GT – Gießtemperatur)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Wironit LA bei Variation der Gießtemperatur ein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließverhalten aufweist. Es wird ein signifikant höheres Ausfließen bei einer Gießtemperaturerhöhung um +100 °C in Höhe von 69 % im Mittelwert erzielt. Dagegen fließt das Prüfgitter bei -100 °C Gießtemperatur signifikant geringer aus, 23 % im Mittelwert.

In der Gruppe der veränderten Vorwärmtemperatur zeigt Wironit LA ein statistisch signifikantes unterschiedliches Ausfließen zwischen den Serien 900 °C VT/1100 °C VT sowie 1000 °C VT/1100 °C VT. Es ist jedoch kein signifikanter Unterschied im Ausfließverhalten zwischen den Serien 900 °C VT/1000 °C VT ersichtlich.

Beim Vergleich der Gruppen der veränderten Vorwärm- und Gießtemperatur zeigt sich, dass eine Gießtemperaturerhöhung ein statistisch signifikant höheres Ausfließen (69 %) zur Folge hat als eine Vorwärmtemperaturerhöhung (49 %). Eine Reduktion der Vorwärmtemperatur um -100 °C zeigt kein signifikant höheres Ausfließen im Gegensatz zur Gießtemperaturreduktion um -100 °C.

### 5.2.3 Ergebnisse der Wironium Plus – Serie

Wironium Plus		Mittelwert	Minimum	Maximum	Standard- abweichung	Variations- koeffizient	
Vorwärm- temperatur	-100 °C	900 °C	24 %	22 %	25 %	1 %	2 %
	Soll	1000 °C	25 %	24 %	27 %	1 %	2 %
	+100 °C	1100 °C	30 %	24 %	39 %	6 %	42 %
Gieß- temperatur	-100 °C	1340 °C	16 %	11 %	19 %	3 %	8 %
	Soll	1440 °C	25 %	24 %	27 %	1 %	2 %
	+100 °C	1540 °C	63 %	48 %	70 %	8 %	70 %

Tab.5.5: Ausfließverhalten von Wironium Plus bei veränderter Vorwärm- bzw. Gießtemperatur

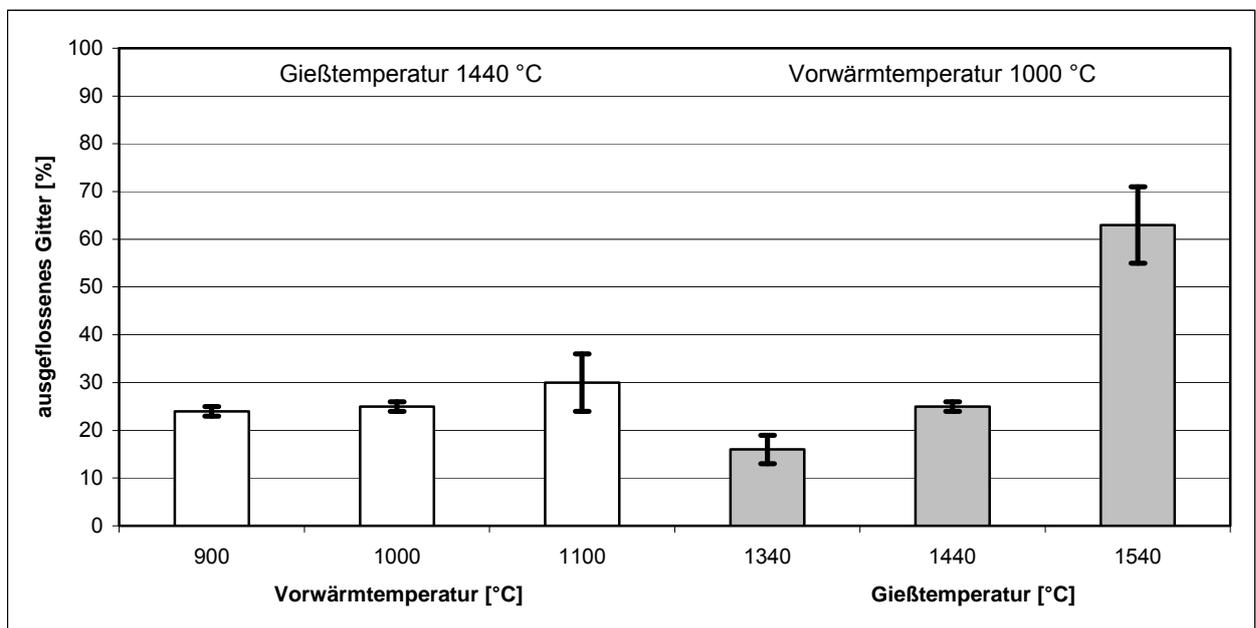


Abb. 5.3: Mittelwerte und Standardabweichungen von Wironium Plus in Abhängigkeit vom veränderten Parameter – Vorwärm- bzw. Gießtemperatur –

Das Ausfließverhalten von Wironium Plus liegt bei einer Vorwärmtemperatur von 100 °C zwischen 22 % und 25 %. Der Mittelwert beträgt 24 %, die Standardabweichung 1 % und der Variationskoeffizient 2 %.

Wird der Prüfkörper jedoch nach Herstellerangaben verarbeitet, liegt das Ausfließverhalten zwischen 24 % und 27 %. Der Mittelwert beträgt 25 %, die Standardabweichung 1 %, der Variationskoeffizient 2 %.

Bei einer Erhöhung der Vorwärmtemperatur um +100 °C wird ein Ausfließverhalten zwischen 24 % und 39 % erzielt. Der Mittelwert beträgt 30 %, die Standardabweichung 6 % und der Variationskoeffizient 42 %.

Wird nun jedoch die Gießtemperatur um -100 °C reduziert, so erreicht Wironium Plus eine Formfüllung zwischen 11 % und 19 %. Der Mittelwert beträgt 16 %, die Standardabweichung 3 %, der Variationskoeffizient 8 %.

Bei einer Gießtemperaturführung um +100 °C fließt das Prüfgitter zwischen 48 % und 70 % aus. Der Mittelwert beträgt 63 %, die Standardabweichung 8 %, der Variationskoeffizient 70 %.

In der folgenden Kreuztabelle 5.6 werden die Ergebnisse der Serien des Ausfließversuchs mit Wironium Plus statistisch miteinander verglichen.

Wironium Plus	900 °C VT	1000 °C VT	1100 °C VT	1340 °C GT	1440 °C GT	1540 °C GT
900 °C VT		<b>7,29 %</b>	<b>5,14 %</b>	0,06 %	<b>7,29 %</b>	0,00 %
1000 °C VT	n.s.		<b>10,46 %</b>	0,02 %		0,00 %
1100 °C VT	n.s.	n.s.		0,18 %	<b>10,46 %</b>	0,00 %
1340 °C GT	*	*	*		0,02 %	0,00 %
1440 °C GT	n.s.		n.s.	*		0,00 %
1540 °C GT	*	*	*	*	*	

Tab. 5.6 : Ergebnisse des Student T – Tests für Wironium Plus (VT – Vorwärmtemperatur/ GT – Gießtemperatur)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Wironium Plus bei einer Gießtemperaturveränderung ein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließverhalten aufweist. Es wird ein signifikant höheres Ausfließen bei einer Gießtemperaturerhöhung um +100 °C in Höhe von 63 % im Mittelwert erzielt. Dagegen fließt das Prüfgitter bei -100 °C Gießtemperatur signifikant geringer aus, 16 % im Mittelwert.

In der Gruppe der veränderten Vorwärmtemperatur zeigt Wironium Plus kein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließverhalten.

Beim Vergleich der Gruppen der veränderten Vorwärm- und Gießtemperatur zeigt sich, dass eine Gießtemperaturerhöhung ein statistisch signifikant höheres Ausfließen zur Folge hat als eine Vorwärmtemperaturerhöhung. Eine Reduktion der Vorwärmtemperatur um -100 °C zeigt kein signifikantes Ausfließen im Vergleich zur Gießtemperaturreduktion um -100 °C, wo 16 % Formfüllung im Mittelwert erzielt werden.

#### **5.2.4 Vergleich der Ergebnisse des Ausfließverhaltens der Modellgusslegierungen**

Unter Herstellerangaben vergossen, weisen WIRONIT (33 %) und WIRONIT LA (33 %) die höchsten mittleren Ausfließraten auf. Senkt man die Vorwärmtemperatur, so zeigt lediglich WIRONIT mit 25 % ein signifikant vermindertes Ausfließen. Erhöht man die Vorwärmtemperatur, so zeigt nur Wironit LA ein signifikant gesteigertes Ausfließen. WIRONIT LA erzielt die höchste mittlere Ausfließrate mit 49 %.

Bei Reduktion der Gießtemperatur fließen die drei Modellgusslegierungen signifikant geringer aus als nach Herstellerangaben verarbeitet. Jedoch sind die mittleren Ausfließraten bei Anhebung der Gießtemperatur um + 100 °C signifikant erhöht. WIRONIT LA weist die höchste mittlere Ausfließrate auf. Folgende Reihenfolge ergibt sich bei Gießtemperaturerhöhung:

WIRONIT LA -> (69 %) -> WIRONIUM PLUS (63 %) -> WIRONIT (61 %).

### 5.3 Ergebnisse des Ausfließverhaltens der EMF – Aufbrennlegierungen

#### 5.3.1 Ergebnisse der Wirobond C – Serie

Wirobond C		Mittelwert	Minimum	Maximum	Standard-abweichung	Variations-koeffizient	
Vorwärm- temperatur	-100 °C	800 °C	51 %	42 %	62 %	7 %	66 %
	Soll	900 °C	39 %	25 %	47 %	8 %	76 %
	+100 °C	1000 °C	56 %	44 %	77 %	10 %	131 %
Gieß- temperatur	-100 °C	1400 °C	29 %	25 %	32 %	2 %	6 %
	Soll	1500 °C	39 %	25 %	47 %	8 %	76 %
	+50 °C	1550 °C	72 %	65 %	82 %	6 %	36 %

Tab. 5.7: Ausfließverhalten von Wirobond C bei veränderter Vorwärm- bzw. Gießtemperatur

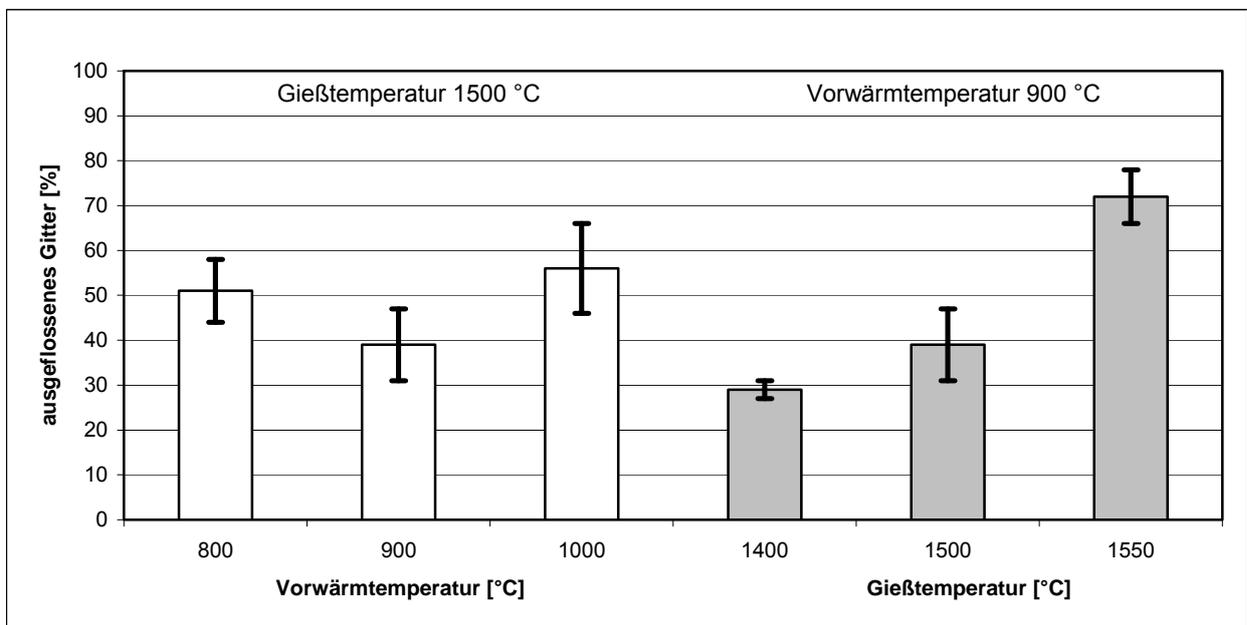


Abb. 5.4: Mittelwerte und Standardabweichungen von Wirobond C in Abhängigkeit vom veränderten Parameter – Vorwärm- bzw. Gießtemperatur –

Das Ausfließverhalten von Wirobond C liegt bei einer Vorwärmtemperatur von  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  zwischen 42 % und 62 %. Der Mittelwert beträgt 51 %, die Standardabweichung 7 % und der Variationskoeffizient 66 %. Wird der Prüfkörper jedoch nach Herstellerangaben verarbeitet und gegossen, so fließt das Prüfgitter zwischen 25 % und 47 % aus. Der Mittelwert beträgt 39 %, die Standardabweichung 8 %, der Variationskoeffizient 76 %.

Bei einer Erhöhung der Vorwärmtemperatur um  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  wird eine Formfüllung zwischen 44 % und 77 % erzielt. Der Mittelwert beträgt 56 %, die Standardabweichung 10 % und der Variationskoeffizient 131 %.

Wird nun jedoch die Gießtemperatur um  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  reduziert, bei einer Vorwärmtemperatur von  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , fließt das Prüfgitter zwischen 25 % und 32 % aus. Der Mittelwert beträgt 29 %, die Standardabweichung 2 %, der Variationskoeffizient 6 %.

Bei einer um  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  geführten Gießtemperatur wird ein Ausfließverhalten zwischen 65 % und 82 % erreicht. Der Mittelwert beträgt 72 %, die Standardabweichung 6 %, der Variationskoeffizient 36 %.

In der folgenden Kreuztabelle 5.8 werden die Ergebnisse der Serien des Ausfließversuchs mit Wirobond C statistisch miteinander verglichen.

Wirobond C	800 °C VT	900 °C VT	1000 °C VT	1400 °C GT	1500 °C GT	1550 °C GT
800 °C VT		4,10 %	<b>40,17 %</b>	0,08 %	4,10 %	0,06 %
900 °C VT	*		2,00 %	3,05 %		0,00 %
1000 °C VT	n.s.	*		0,18 %	2,00 %	0,02 %
1400 °C GT	*	*	*		3,05 %	0,00 %
1500 °C GT	*		*	*		0,00 %
1550 °C GT	*	*	*	*	*	

Tab. 5.8 : Ergebnisse des Student T – Tests für Wirobond C (VT – Vorwärmtemperatur/ GT – Gießtemperatur)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Wirobond C bei Gießtemperaturveränderungen ein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließverhalten aufweist. Es wird ein signifikant höheres Ausfließen bei einer Gießtemperaturerhöhung um +50 °C in Höhe von 72 % im Mittelwert erzielt. Dagegen fließt das Prüfgitter bei -100 °C Gießtemperatur signifikant geringer aus, 29 % im Mittelwert.

In der Gruppe der veränderten Vorwärmtemperatur zeigt Wirobond C ein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließverhalten. Keine Signifikanz wurde zwischen den Serien 800 °C VT/ 1000 °C VT ermittelt.

Beim Vergleich der Gruppen der veränderten Vorwärm- und Gießtemperatur zeigt sich, dass eine Gießtemperaturerhöhung ein statistisch signifikant höheres Ausfließen (72 %) zur Folge hat als eine Vorwärmtemperaturerhöhung (56 %). Eine Reduktion der Vorwärmtemperatur um -100 °C zeigt mit 51 % ausgeflossenem Gitter im Mittelwert ein signifikant höheres Ausfließen als bei einer Gießtemperaturreduktion um -100 °C, 29 % ausgeflossenes Gitter im Mittelwert.

**5.3.2 Ergebnisse der Wirobond LFC – Serie**

Wirobond LFC		Mittelwert	Minimum	Maximum	Standard- abweichung	Variations- koeffizient	
Vorwärm- temperatur	-100 °C	800 °C	47 %	44 %	53 %	3 %	12 %
	Soll	900 °C	47 %	44 %	53 %	3 %	10 %
	+100 °C	1000 °C	75 %	61 %	92 %	13 %	192 %
Gieß- temperatur	-100 °C	1380 °C	28 %	24 %	39 %	5 %	32 %
	Soll	1480 °C	47 %	44 %	53 %	3 %	10 %
	+70 °C	1550 °C	81 %	75 %	91 %	7 %	63 %

Tab. 5.9: Ausfließverhalten von Wirobond LFC bei veränderter Vorwärm- bzw. Gießtemperatur

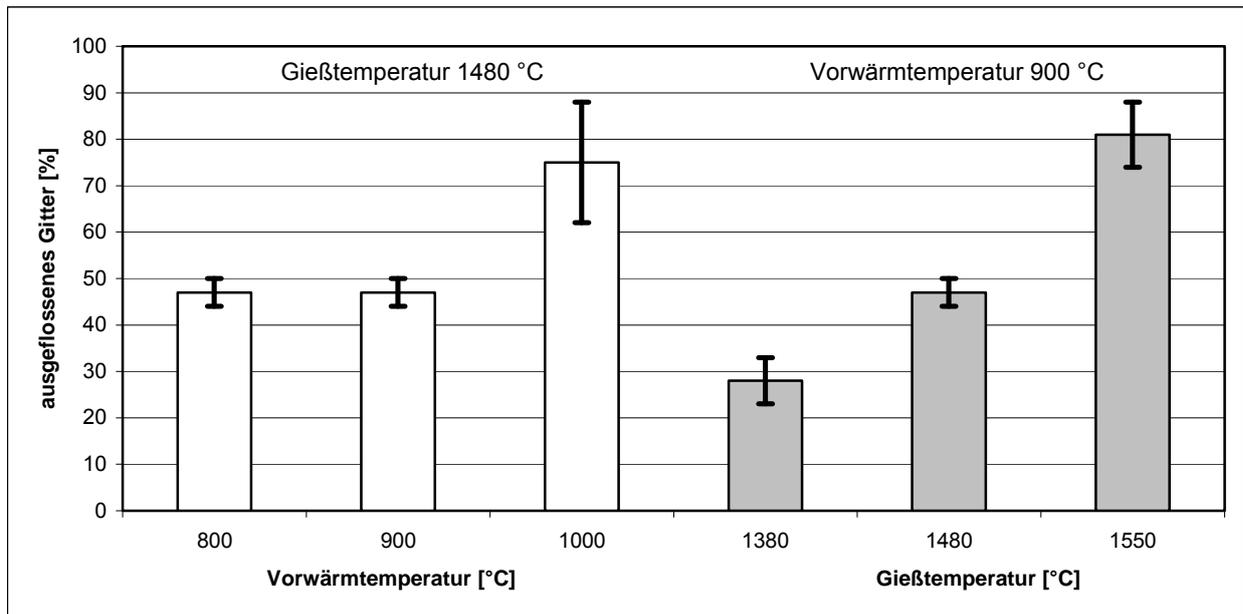


Abb. 5.5: Mittelwerte und Standardabweichungen von Wirobond LFC in Abhängigkeit vom veränderten Parameter – Vorwärm- bzw. Gießtemperatur –

Das Ausfließverhalten von Wirobond LFC liegt bei einer Vorwärmtemperatur von  $-100\text{ °C}$  und einer Gießtemperatur im Sollbereich zwischen 44 % und 53 %. Der Mittelwert beträgt 47 %, die Standardabweichung 3 % und der Variationskoeffizient 12 %.

Wird der Prüfkörper jedoch nach Herstellerangaben verarbeitet und gegossen, so liegt die ermittelte Formfüllung zwischen 44 % und 53 %. Der Mittelwert beträgt 47 %, die Standardabweichung 3 %, der Variationskoeffizient 10 %. Bei einer Erhöhung der Vorwärmtemperatur um  $+100\text{ °C}$  wird ein Ausfließverhalten zwischen 61 % und 92 % erzielt. Der Mittelwert beträgt 75 %, die Standardabweichung 13 % und der Variationskoeffizient 192 %.

Bei einer Gießtemperaturführung um  $-100\text{ °C}$  fließt das Gitter zwischen 24 % und 39 % aus. Der Mittelwert beträgt 28 %, die Standardabweichung 5 %, der Variationskoeffizient 32 %. Bei einer Gießtemperaturanhebung um  $+70\text{ °C}$  wird ein Ausfließverhalten zwischen 75 % und 91 % erreicht. Der Mittelwert beträgt 81 %, die Standardabweichung 7 %, der Variationskoeffizient 63 %.

In der folgenden Kreuztabelle 5.10 werden die Ergebnisse der Serien des Ausfließversuchs mit Wirobond LFC statistisch miteinander verglichen.

Wirobond LFC	800 °C VT	900 °C VT	1000 °C VT	1380 °C GT	1480 °C GT	1550 °C GT
800 °C VT		<b>82,00 %</b>	0,38 %	0,00 %	<b>82 %</b>	0,00 %
900 °C VT	n.s.		0,36 %	0,01 %		0,00 %
1000 °C VT	*	*		0,02 %	0,36 %	<b>34,54 %</b>
1380 °C GT	*	*	*		0,01 %	0,00 %
1480 °C GT	n.s.		*	*		0,00 %
1550 °C GT	*	*	n.s.	*	*	

Tab. 5.10 : Ergebnisse des Student T – Tests für Wirobond LFC (VT – Vorwärmtemperatur / GT – Gießtemperatur)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Wirobond LFC bei einer Gießtemperaturveränderung ein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließverhalten aufweist. Es wird ein signifikant höheres Ausfließen bei einer Gießtemperaturerhöhung um +70 °C (81 %) erzielt. Dagegen fließt das Prüfgitter bei -100 °C Gießtemperatur signifikant geringer aus (28 %). In der Gruppe der veränderten Vorwärmtemperatur zeigt Wirobond LFC ein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließverhalten. Eine Vorwärmtemperaturerhöhung von +100 °C hat mit 75 % ausgeflossenen Gitter im Mittelwert ein statistisch signifikant höheres Ausfließen. Eine Reduzierung der Vorwärmtemperatur weist im Vergleich zum Ausfließen im Sollbereich kein statistisch signifikantes Ausfließen der Legierung auf. Vergleicht man die Gruppen der veränderten Vorwärm- und Gießtemperatur miteinander, so zeigt sich, dass eine Gießtemperaturerhöhung kein statistisch signifikant höheres Ausfließen im Vergleich zur Vorwärmtemperaturerhöhung zur Folge hat. Eine Reduktion der Vorwärmtemperatur um -100 °C zeigt ein signifikant höheres Ausfließen (47 %) als bei einer Gießtemperaturreduktion um -100 °C (28 %).

### 5.3.3 Ergebnisse der Wiron 99 – Serie

Wiron 99		Mittelwert	Minimum	Maximum	Standard- abweichung	Variations- koeffizient	
Vorwärm- temperatur	-100 °C	800 °C	50 %	44 %	61 %	6 %	38 %
	Soll	900 °C	42 %	30 %	48 %	5 %	36 %
	+100 °C	1000 °C	65 %	51 %	85 %	11 %	144 %
Gieß- temperatur	-100 °C	1350 °C	27 %	25 %	29 %	1 %	2 %
	Soll	1450 °C	42 %	30 %	48 %	5 %	36 %
	+100 °C	1550 °C	86 %	84 %	100 %	9 %	96 %

Tab. 5.11: Ausfließverhalten von Wiron 99 bei veränderter Vorwärm- bzw. Gießtemperatur

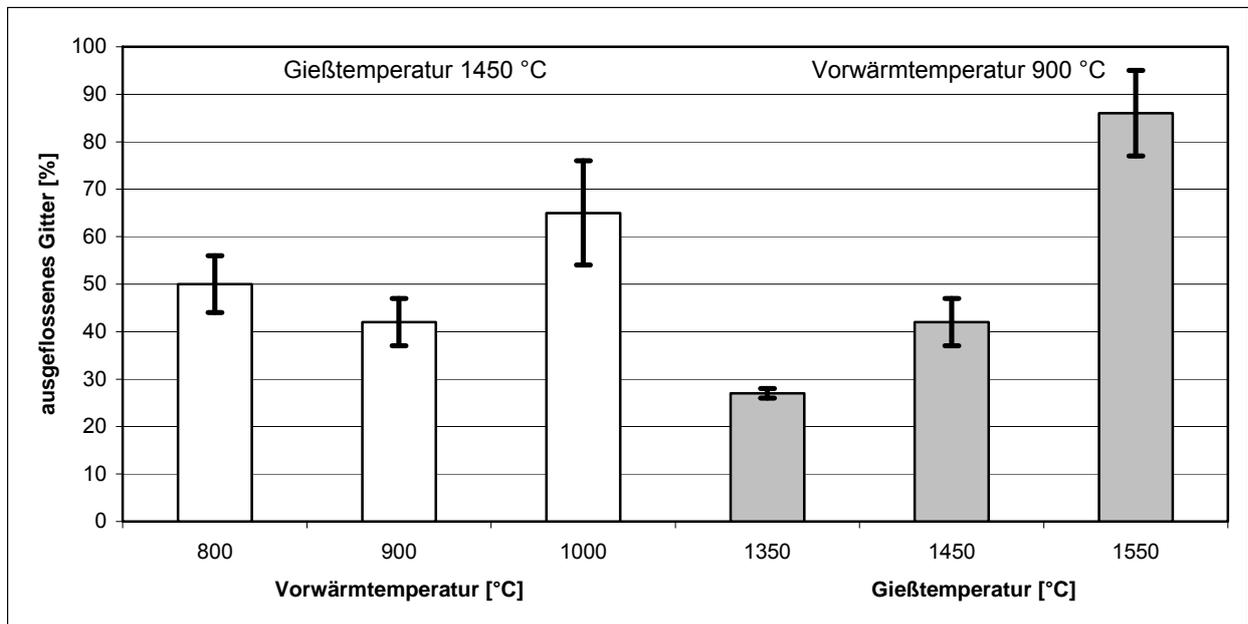


Abb. 5.6: Mittelwerte und Standardabweichungen von Wiron 99 in Abhängigkeit vom veränderten Parameter – Vorwärm- bzw. Gießtemperatur –

Das Ausfließverhalten von Wiron 99 liegt bei einer Vorwärmtemperatur von  $-100\text{ °C}$  zwischen 44 % und 61 %. Der Mittelwert beträgt 50 %, die Standardabweichung 6 % und der Variationskoeffizient 38 %.

Wird der Prüfkörper jedoch nach Herstellerangaben verarbeitet und gegossen wird eine Formfüllung zwischen 30 % und 48 % erreicht. Der Mittelwert beträgt 42 %, die Standardabweichung 5 %, der Variationskoeffizient 36 %.

Bei einer Vorwärmtemperatursteigerung um  $+100\text{ °C}$  wird ein Ausfließverhalten zwischen 51 % und 85 % erzielt. Der Mittelwert beträgt 65 %, die Standardabweichung 11 % und der Variationskoeffizient 144 %.

Wird nun jedoch die Gießtemperatur um  $-100\text{ °C}$  reduziert, so erzielt Wiron 99 eine Formfüllung zwischen 25 % und 29 %. Der Mittelwert beträgt 27 %, die Standardabweichung 1 %, der Variationskoeffizient 2 %. Bei einer Gießtemperaturführung  $+100\text{ °C}$  werden die Prüfgitter zwischen 84 % und 100 % gefüllt. Der Mittelwert beträgt 86 %, die Standardabweichung 9 %, der Variationskoeffizient 96 %.

In der folgenden Kreuztabelle 5.12 werden die Ergebnisse der Serien des Ausfließversuchs mit Wiron 99 statistisch miteinander verglichen.

<b>Wiron 99</b>	800 °C VT	900 °C VT	1000 °C VT	1350 °C GT	1450 °C GT	1550 °C GT
800 °C VT		3,28 %	3,53 %	0,02 %	3,28 %	0,00 %
900 °C VT	*		0,38 %	0,16 %		0,00 %
1000 °C VT	*	*		0,06 %	0,38 %	0,79 %
1350 °C GT	*	*	*		0,16 %	0,00 %
1450 °C GT	*		*	*		0,00 %
1550 °C GT	*	*	*	*	*	

Tab. 5.12: Ergebnisse des Student T – Tests für Wiron 99 (VT – Vorwärmtemperatur/ GT – Gießtemperatur)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Wiron 99 bei Vorwärm- sowie Gießtemperaturveränderungen ein statistisch signifikant unterschiedliches Ausfließverhalten aufweist.

Beim Vergleich der Gruppen der veränderten Vorwärm- und Gießtemperatur zeigt sich, dass eine Gießtemperaturerhöhung um +100 °C ein statistisch signifikant höheres Ausfließen (84 %) zur Folge hat als eine Vorwärmtemperaturerhöhung (65 %).

Eine Reduktion der Vorwärmtemperatur um -100 °C zeigt mit 50 % ausgeflossenem Gitter im Mittelwert ein signifikant höheres Ausfließen als bei einer Gießtemperaturreduktion um -100 °C, 27 % ausgeflossenes Gitter im Mittelwert.

#### **5.3.4 Vergleich der Ergebnisse des Ausfließverhaltens der EMF – Aufbrennlegierungen**

Nach Angaben des Herstellers verarbeitet, weist WIROBOND LFC (47 %) die höchste mittlere Ausfließrate im Vergleich zu WIROBOND C (39 %) und WIRON 99 (42 %) auf.

Eine Reduktion der Vorwärmtemperatur bewirkt bei WIROBOND C (51 %) und WIRON 99 (50 %) jedoch ein signifikant höheres Ausfließen der Prüfkörper als nach Herstellerangaben vergossen. Wird die Vorwärmtemperatur erhöht, so weisen alle 3 Legierungen signifikant höhere mittlere Ausfließraten auf. Folgende Reihenfolge der Ausfließraten bei erhöhter Vorwärmtemperatur ergibt sich:

WIROBOND LFC (75 %) -> WIRON 99 (65 %) -> WIROBOND C (56 %).

Eine reduzierte Gießtemperatur hat bei allen drei aufbrennfähigen EMF – Legierungen ein signifikant vermindertes Ausfließen zur Folge. Eine Gießtemperatursteigerung um + 100 °C bewirkt wiederum signifikant gesteigerte mittlere Ausfließraten. Folgende Reihenfolge ergibt sich bei Anhebung der Gießtemperatur:

WIRON 99 (86 %) -> WIROBOND LFC (81%) -> WIROBOND C (72 %).

## 5.4 Vergleich der Ergebnisse des Ausfließverhaltens der Modellgusslegierungen mit den der EMF – Aufbrennlegierungen

### 5.4.1 Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur

Legierung	Wironit	Wironit LA	Wironium Plus	Wirobond C	Wirobond LFC	Wiron 99
VT						
VT= - 100 °C	25 % 0,75	33 % 1	24 % 0,96	51 % 1,3	47 % 1	50 % 1,19
GT/VT= Soll	33 % 1	33 % 1	25 % 1	39 % 1	47 % 1	42 % 1
VT= +100 °C	36 % 1,09	49 % 1,48	30 % 1,2	56 % 1,43	75 % 1,59	65 % 1,54

Tab. 5.13: Mittlere Ausfließraten der untersuchten EMF – Legierungen (GT: Gießtemperatur/ VT: Vorwärmtemperatur) mit Bezug auf die Referenzmessung – Gießtemperatur nach Herstellerangaben –

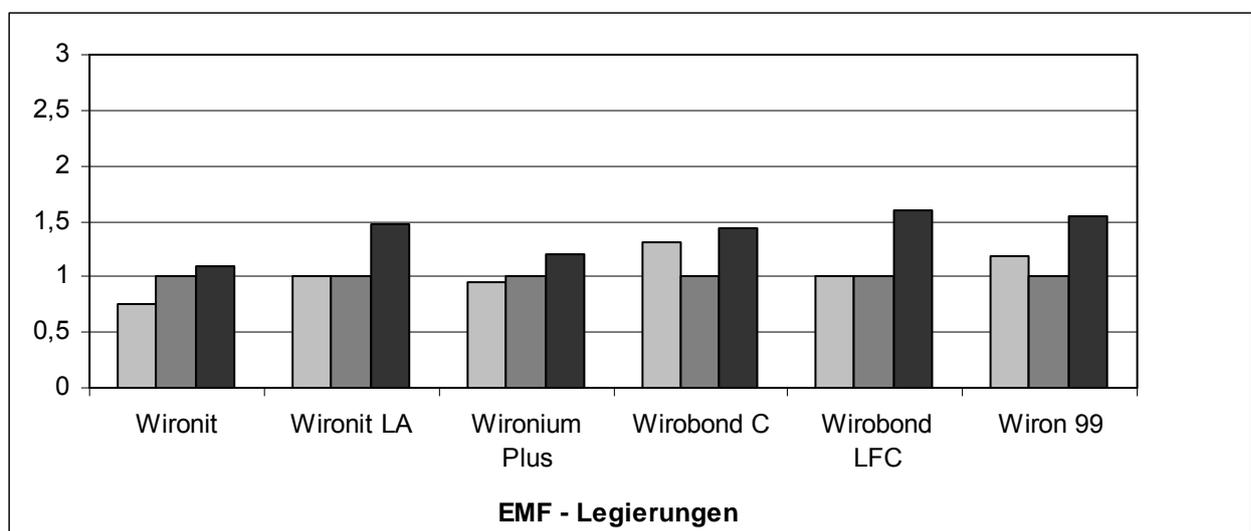


Abb. 5.7: Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der *Vorwärmtemperatur* (Gießtemperatur gemäß Herstellerangaben). Die jeweiligen Ausfließraten der Legierungen wurden auf die Referenzmessung (Gießtemperatur im Sollbereich – mittlere Säule) bezogen. Werte <1 weisen auf ein niedrigeres, Werte >1 auf ein höheres Ausfließverhalten hin.

Unter Veränderung der *Vorwärmtemperatur* variieren die mittleren Ausfließraten der Modellgusslegierungen WIRONIT, WIRONIT LA, WIRONUIM PLUS sowie die der aufbrennfähigen EMF – Legierungen WIROBOND C, WIROBOND LFC, WIRON 99 von 0,75 bis 1,59.

Dabei weisen die Modellgusslegierungen bei einer Minderung der Vorwärmtemperatur ein niedrigeres Ausfließen auf als die aufbrennfähigen EMF – Legierungen WIROBOND C und WIRON 99.

Eine Anhebung der Vorwärmtemperatur hat bei allen sechs Legierungen ein höheres Ausfließen (1,09 bis 1,59) zur Folge. In der Gruppe der Modellgusslegierungen zeigt WIRONIT LA mit 1,48 und WIROBOND LFC aus der Gruppe der aufbrennfähigen EMF – Legierungen mit 1,59 das höchste Ausfließverhalten.

### 5.4.2 Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der Gießtemperatur

Legierung	Wironit	Wironit LA	Wironium Plus	Wirobond C	Wirobond LFC	Wiron 99
GT						
GT= - 100 °C	20 % 0,606	23 % 0,69	16 % 0,64	29 % 0,74	28 % 0,59	27 % 0,64
GT/VT= Soll	33 % 1	33 % 1	25 % 1	39 % 1	47 % 1	42 % 1
GT= +100 °C	61 % 1,848	69 % 2,09	63 % 2,52	72 % 1,84	81 % 1,72	86 % 2,04

Tab. 5.14: Mittlere Ausfließraten der untersuchten EMF – Legierungen (GT: Gießtemperatur/ VT: Vorwärmtemperatur) mit Bezug auf die Referenzmessung – Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben.

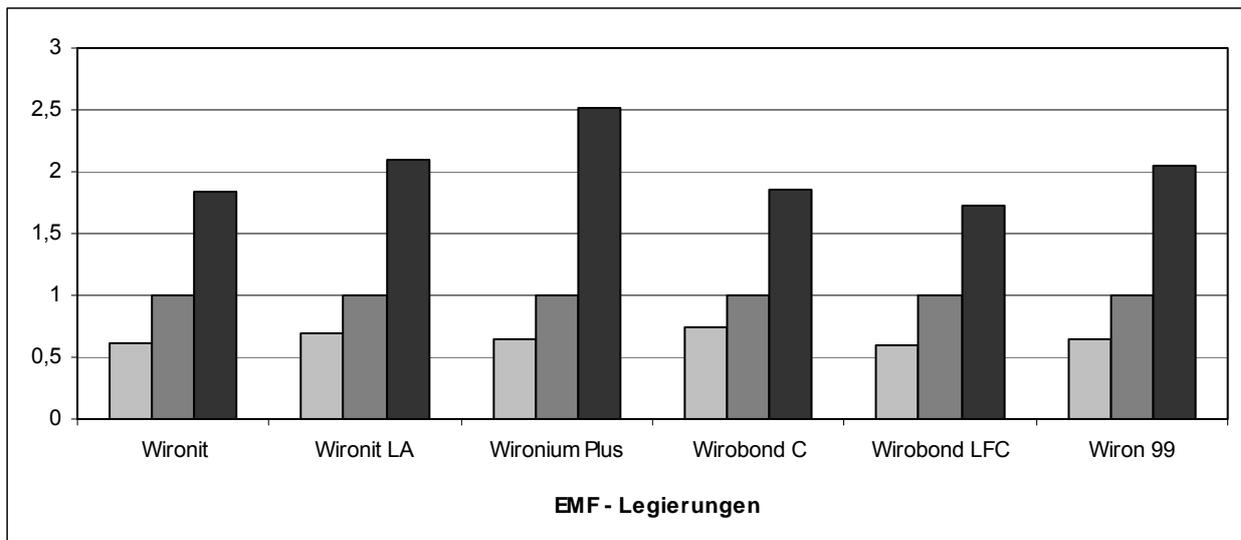


Abb. 5.8: Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der *Gießtemperatur* (Vorwärmtemperatur gemäß Herstellerangaben). Die jeweiligen Ausfließraten der Legierungen wurden auf die Referenzmessung (Vorwärmtemperatur im Sollbereich – mittlere Säule) bezogen. Werte <1 weisen auf ein niedrigeres, Werte >1 auf ein höheres Ausfließverhalten hin.

Die Variationsbreite der mittleren Ausfließraten der sechs EMF – Legierungen bei Veränderung der Gießtemperatur reichen von 0,59 (WIROBOND LFC) bis 2,52 (WIRONIUM PLUS).

Bei Reduzierung der Gießtemperatur zeigen beide Legierungsgruppen ein niedrigeres Ausfließverhalten (Werte von 0,59 bis 0,74), wobei WIRONIT aus der Gruppe der Modellgusslegierungen mit einem Wert von 0,60 und WIROBOND LFC aus der Gruppe der aufbrennfähigen EMF – Legierungen mit einem Wert von 0,74 die niedrigsten Ausfließraten zeigen.

Dagegen bedeutet eine Gießtemperaturerhöhung ein höheres Ausfließen aller untersuchten EMF – Legierungen (1,72 bis 2,52). Die Modellgusslegierung WIRONIUM PLUS zeigt mit einem Wert von 2,52 und die aufbrennfähige Legierung WIRON 99 mit einem Wert von 2,04 das höchste Ausfließverhalten aller untersuchten Legierungen.

Es ist eine Gruppenbildung erkennbar. Die Modellgusslegierungen fließen bei erhöhter Gießtemperaturführung im Mittelwert signifikant höher aus als die aufbrennfähigen EMF – Legierungen.

## 5.5 Fazit

Das Ausfließverhalten variiert abhängig vom gießtechnologischen Parameter – Vorwärm- bzw. Gießtemperatur – zwischen 16 % und 86 % ausgeflossenem Gitter im Mittelwert. Kein Gitter floss zu 0 % oder 100 % aus.

Zusammenfassend wurden folgende Ergebnisse festgestellt:

- Veränderungen der Vorwärm- bzw. Gießtemperatur ergaben variierende Formfüllungsraten der EMF – Legierungen.
- Unter einer zu hoch geführten Gießtemperatur konnten bei allen hier untersuchten EMF – Legierungen signifikant höhere mittlere Ausfließraten erzielt werden als durch Anhebung der Vorwärmtemperatur.
- Auffällig ist der Anstieg der mittleren Ausfließraten von WIROBOND C und WIRON 99 bei um – 100 °C geführter Vorwärmtemperatur.
- Es ist eine legierungsspezifische Gruppenbildung sichtbar. Die Modelgusslegierungen WIRONIT, WIRONIT LA und WIRONIUM PLUS weisen bei einer um + 100 °C angehobenen Gießtemperatur höhere mittlere Ausfließraten auf als die Legierungen für die Aufbrenntechnik – WIROBOND C, WIROBOND LFC, WIRON 99 –.
- Auffallend sind die generell hohen Werte der Standardabweichung bzw. des Variationskoeffizienten bei erhöhter Vorwärm- bzw. Gießtemperatur.

## **6 Diskussion**

### **6.1 Fehlerbetrachtung**

Im Kapitel der Diskussion werden die erzielten Versuchsergebnisse kritisch bewertet und dabei möglich entstandene Fehler im Prozess der Prüfkörpermodellation, in der Gussvorbereitung, dem Guss und der Auswertung des Ausfließtests aufgezeigt. Die Analyse der verfahrenstechnischen Fehler erlaubt es dann eine Aussage über die Eignung des hier dargestellten Ausfließtests zu treffen.

Generell wurden folgende allgemeingültige Grundregeln eingehalten, um das Fehlerausmaß so gering wie möglich zu halten:

- Grundmaterialien der gleichen Charge verwendet
- Anwendung immer der gleichen Geräte
- Lagerung und Verarbeitung der Materialien gemäß Herstellerangaben
- Konzentriertes und exaktes Arbeiten von ein und dem selben Prüfer
- serienweise Vorgehensweise bei der Prüfkörperherstellung und Auswertung

#### **6.1.1 Prüfkörperherstellung**

##### **Prüfkörpermodellation in Wachs**

Grundgestalt des Prüfgitters ist ein genormtes Wachsretentionsgitter der Firma BEGO, das von ein und demselben Prüfer manuell (Prüfkörperform nach HÄßELBARTH [40], Kapitel 4.3.1), mit einem scharfen Skalpell zurechtgeschnitten wurde. Jeweils vor und nach der Modifikation der Wachsgitter, es wurden immer sechs Gitter hintereinander pro Serie geschnitzt, wurden diese im Kühlschrank gelagert, um somit Dimensionsveränderungen im Wachs und damit Ungenauigkeiten in der Prüfkörpergeometrie zu vermeiden. Nach DÖRFLER wäre die Verwendung kunststoffbasierender Prüfgitter formbeständiger [32].

Eine veränderte Prüfkörpergestalt hat nach HOWARD, SAUER und BARGET ein verändertes Erstarrungsmodul zur Folge, was die Abkühlungsgeschwindigkeit und somit die Formfüllung positiv oder negativ beeinflusst [7, 53, 93].

### **Gussvorbereitung (Anstiftung, Einbettung, Vorwärmung)**

Die Länge, Stärke und Form des Gusskanals, deren Ausrichtung und Lokalisation in der Muffel haben einen entscheidenden Einfluss auf die Formfüllung [5, 6, 101, 113]. Um reproduzierbare Resultate zu erhalten, wurde zum Anstiften jeweils ein exakt 1 cm langer und 3 mm starker Anstiftdraht, abgemessen mittels einer geeichten Messlehre, aus rückstandslos verbrennbarem Wachs verwendet. Jedes Prüfgitter wurde horizontal in einer „3er“ Muffel, ausgekleidet mit einer asbesthaltigen Muffelringeinlage, in einem 90° Winkel zum Gusskanal mittig in der Muffel positioniert. Dies geschah per Augenmaß, was gewisse Ungenauigkeiten zur Folge haben könnte. Die Mitte der Muffel fungiert während des Gusses als thermisches Zentrum, wo das Metall am längsten flüssig bleibt [16].

Die Einbettmassen Wirovest® und Bellavest® SH wurden maschinell exakt dosiert [129] und in demselben Vakuummischgerät verarbeitet. Auf einem Rüttler wurden pro Serie sechs Muffeln, ausgekleidet mit jeweils einer Muffeleinlage, mit der entsprechenden Einbettmasse weitestgehend blasenfrei und dicht befüllt, um Ungenauigkeiten in der Prüfkörperform zu reduzieren. SMITH verweist zum einen auf die Bedeutung der Anzahl der verwendeten asbesthaltigen – Muffeleinlagen bezüglich der Formfüllung hin und zum anderen auf ein genau dosiertes Mischungsverhältnis Liquid/Wasser hin [2, 98]. Sämtliche Muffeln kühlten bei Zimmertemperatur gleichermaßen ab [8].

Die rückstandslose Verbrennung des Wachses erfolgte in einem programmierten elektrischen Vorwärmofen, wo die Muffeln serienweise einer kontrollierten gleichmäßigen Erhitzung und Expansion unter exakter Temperaturkontrolle unterlagen [129]. Es wurden für jede untersuchte Legierung zum einen um 100 °C erhöhte und zum anderen um 100 °C erniedrigte Vorwärmtemperaturen gewählt. WEBER verweist auf eine ausreichend starke Vorwärmung, um entsprechende Ergebnisse bezüglich der Fließfähigkeit einer Legierung zu erhalten [125].

### **Guss**

Die Muffeln wurden nach vollständig abgeschlossener Vorwärmung in den mit der entsprechenden Gießtemperatur programmierten Gießapparat – NAUTILUS CC der Firma BEGO – eingelegt. Eine zu starke Abkühlung der Muffeln während des Verladevorgangs in den Gießapparat ist möglich, wurde jedoch durch eine zügige Arbeitsweise reduziert. Durch die automatische Gießzeitpunkterkennung (Auslösen des

Gusses bei einer zuvor eingegebenen Gießtemperatur) und optische Kontrolle des Schmelzgutes sind Fehler beim Start und während des Schmelz- und Gießvorgangs auf ein Minimum reduziert. Die korrekt eingestellte Gießtemperatur wird von einigen Autoren als sehr bedeutend für die Formfüllung angesehen [48, 60, 86, 110, 112, 113]. Die Gießtemperaturen der Legierungen WIRONIT wurden um 90 °C, WIROBOND C um 50 °C und WIROBOND LFC um 70 °C erhöht. Eine um 100 °C erhöhte Gießtemperatur erfolgte bei den Legierungen WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS sowie WIRON 99. Da die Gießtemperaturerhöhung der Legierungen WIRONIT, WIROBOND C sowie WIROBOND LFC nicht gleichermaßen um jeweils 100 °C erfolgte (maximal einzustellende Gießtemperatur bei NAUTILUS CC liegt bei 1550 °C), sind die Resultate zwar vergleichbar, jedoch wäre hier eine Korrektur der entsprechenden mittleren Fließraten nach oben zu tätigen.

Die Qualität des Ausbettens hat für den hier durchgeführten quantitativen Ausfließtest keine Relevanz und wird daher nicht weiter betrachtet.

### **6.1.2 Auswertung der Prüfkörper**

Die Auswertung der Probenkörper verlief nach einem einfachen Prinzip. Serienweise wurde die Formfüllung eines jeden einzelnen Gitters durch visuelles Auszählen der vollständig ausgeflossenen Kästchen bestimmt. Nur vollständig ausgeformte Kästchen wurden quantitativ erfasst. Ob es sich um eine komplette Ausformung des Gitterkästchens handelt, liegt dabei im Auge des Prüfers und birgt daher ein gewisses Fehlerpotenzial von in etwa 1 %.

### **6.1.3 Eignung des Ausfließtestes**

Ist das hier gewählte Testverfahren in der Lage das Fließvermögen der sechs untersuchten EMF – Legierungen quantitativ zu beurteilen?

Angelehnt an die von HINMAN et al. [49] aufgestellten Kriterien für Ausfließtests (Kap. 3.2.3) ist der hier durchgeführte Formfüllungstest durchaus praxistauglich. Es wurden handelsübliche Materialien und Geräte aus dem Dentalbereich benutzt. Eine einfache Herstellbarkeit der Prüfkörper sowie Muffeln ist gewährleistet. Jedoch wäre die

Entwicklung einer Apparatur, um hundertprozentig gleiche Prüfkörperrohlinge zu produzieren sinnvoll, um Abweichungen der Ergebnisse weiter zu reduzieren. Eine leichte visuelle Auswertbarkeit der gegossenen Proben lässt objektive Messergebnisse zu. Da kein Gitter im Mittelwert zu 0 % bzw. 100 % ausfloss, ist dieser Test gut dazu geeignet das Verhalten des Schmelzgutes unter veränderten Vorwärm- und Gießbedingungen sichtbar zu machen. Kritisch zu betrachten sind jedoch die teilweise hohen Werte der Standardabweichung bzw. des Variationskoeffizienten, die ein Maß für Ungenauigkeiten im Prüfsystem darstellen. Stark erhöhte Werte des Variationskoeffizienten treten vorwiegend bei einer zu hoch geführten Vorwärm- bzw. Gießtemperatur auf. Zum einen werden Turbulenzen in der überhitzten Schmelze [7] und zum anderen der Einfluss der Wärmestrahlung bei Temperaturen über 600 °C dafür verantwortlich gemacht [127]. Je kleiner die Variationskoeffizienten der Serien, desto günstiger ist die Präzision eines jeden Probenkörpers. Liegt eine hohe Streubreite um den Mittelwert herum vor, sind die Ergebnisse nur schlecht reproduzierbar. Eine Erhöhung der Prüfkörperanzahl kann die Reproduzierbarkeit sicherstellen und lässt den Einfluss von verfahrenstechnischen Fehlern in den Hintergrund treten.

## **6.2 Diskussion der Versuchsergebnisse**

### **6.2.1 Vergleich der Modellgusslegierungen und der EMF – Aufbrennlegierungen**

#### **6.2.1.1 Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur**

Signifikant gesteigerte Formfüllungsraten aufgrund erhöhter Vorwärmtemperaturen der Muffeln konnten bei beiden Legierungsgruppen festgestellt werden, ausgenommen Wironit und Wironium Plus. WIRONIT LA aus der Gruppe der Modellgusslegierungen sowie WIROBOND LFC aus der Gruppe der EMF – Aufbrennlegierungen zeigten die höchsten mittleren Ausfließraten. Zu einem linearen Anstieg der mittleren Formfüllungsraten mit zunehmender Muffeltemperatur wie von HIRANO und TESK [50] sowie JARVIS [59] festgestellt, kann im Vergleich mit den eigenen Versuchsergebnissen keine Aussage getroffen werden. Dazu wäre eine Ausdehnung

der Meßwertermittlung der eigenen Untersuchung (Einteilung der Vorwärmtemperatur -100/-75/-50/-25 °C – nach Herstellerangaben – +25 /+50 /+75/+100 °C) notwendig. Tendenziell wird aus Tabelle 5.13 deutlich, dass die Gruppe der EMF – Aufbrennlegierungen bei VT +100 °C besser ausfließen als die Modellgusslegierungen.

Eine Muffeltemperaturführung -100 °C bezogen auf die Temperaturvorgabe durch den Hersteller bewirkt wie WEBER [125] in seinen Untersuchungen festgestellt hat, eine Herabsetzung der Schmelzgutviskosität aufgrund eines schnellen Wärmeabflusses (Schalenbildung an Muffelinnenwand) [107], wodurch der Muffelhohlkörper nicht vollständig ausgefüllt wird. Allerdings widersprechen dem die eigenen ermittelten Werte der EMF – Aufbrennlegierungen WIROBOND C und WIRON 99, die trotz um 100 °C herabgesetzter Vorwärmtemperatur höchste mittlere Ausfließraten aufweisen als nach Herstellerangaben verarbeitet.

#### **6.2.1.2 Vergleich des Ausfließverhaltens in Abhängigkeit von der Gießtemperatur**

Eine Gießtemperatursteigerung bewirkte generell bei den Modellguss- sowie EMF – Aufbrennlegierungen signifikant erhöhte Ausfließraten, wobei WIRONIUM PLUS (Modellgusslegierung) und WIRON 99 (EMF – Aufbrennlegierung) die höchsten mittleren Formfüllungsraten aufweisen. Vergleicht man die Legierungsgruppen miteinander, so schneiden die Modellgusslegierungen im Vergleich zu den EMF – Aufbrennlegierungen bei GT +100 °C deutlich besser ab. Dies sollte jedoch kritisch betrachtet werden. Aufgrund der im Gießapparat NAUTILUS CC maximal einzustellenden Gießtemperatur von 1550 °C wurden die Gießtemperaturen bei der WIRONIT – Serie um nur 90 °C, bei der WIROBOND C – Serie um 50 °C und bei der WIROBOND LFC – Serie um lediglich 70 °C erhöht, weshalb die Formfüllungsraten entsprechend niedriger ausfallen.

Die eigenen Ergebnisse stehen im Einklang mit den Ergebnissen von JOHNSON und WINSTANLEY [60], PRESTON und BERGER [86], THOMPSON [112], TANGSGOOLWATANA [110], VAIDYANATHAN [113]. Einem von HERO ermittelten linearen Zusammenhang zwischen Fließfähigkeit von EMF – Legierungen mit steigender Gießtemperatur [45] kann mit den eigenen Versuchsergebnissen weder

zugestimmt noch widersprochen werden. Dazu müssten die bereits durchgeführten Versuche ausgedehnt und ergänzt werden durch ermittelte Formfüllungsraten bei veränderter Gießtemperaturskalierung (-100/-75/-50/-25 °C – nach Herstellerangaben – +25/+50/+75/+100 °C).

### **Beweisführung für die gesteigerte Formfüllung der Modellgusslegierungen**

Das erhöhte Ausfließverhalten der Modellgusslegierungen (MOG) gegenüber der EMF – Aufbrennlegierungen bei GT +100 °C kann mit der unterschiedlichen mittleren Differenz zwischen Vorwärm- und Gießtemperatur der Legierungsgruppen begründet werden, obwohl beide in etwa gleich hohe Schmelzintervalle aufweisen (MOG: 1300 – 1350 °C/ EMF – Aufbrennlegierung: 1250 – 1380 °C). Bewiesen werden kann dieser Sachverhalt mit der Formel zur Berechnung des ausgetauschten Wärmestroms  $Q_z$  (siehe Glg. 3.9), wobei folgende Werte bekannt sind:

<b>MOG</b>	VT= Soll	GT= +100 °C
Wironit	1000 °C	1550 °C
Wironit LA	1000 °C	1550 °C
Wironium Plus	1000 °C	1540 °C
mittlere VT/GT	1000 °C	1547 °C
mittlere Differenz VT/GT	~ 547 °C	

Tbb. 6.1: Vorwärmtemperaturen/VT (Sollbereich) und Gießtemperaturen/ GT (+100 °C) der Modellgusslegierungen Wironit/ Wironit LA/ Wironium Plus sowie die mittlere VT/GT und mittlere Differenz zwischen VT und GT

<b>EMF – Aufbrenn- legierung</b>	VT= Soll	GT= +100 °C
Wirobond C	900 °C	1550 °C
Wirobond LFC	900 °C	1550 °C
Wiron 99	900 °C	1550 °C
mittlere VT/GT	900 °C	1550 °C
mittlere Differenz VT/GT	~ 650 °C	

Tbb. 6.2: Vorwärmtemperaturen/ VT (Sollbereich) und Gießtemperaturen/ GT (+100 °C) der EMF – Aufbrennlegierungen sowie die mittlere VT/GT und mittlere Differenz zwischen VT und GT

Aus der mittleren Differenz VT/GT der Modellgusslegierungen und EMF – Aufbrennlegierungen ergibt sich folgender berechneter Wärmeaustausch  $Q_z$  :

$$\text{Glg. 6.1: } Q_z = C \cdot F \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_{z/\text{MOG}} = C \cdot F \cdot \left[ \left( \frac{1547}{100} \right)^4 - \left( \frac{1000}{100} \right)^4 \right]$$

$$Q_{z/\text{MOG}} = C \cdot F \cdot 57274,49 - 10000$$

$$Q_{z/\text{MOG}} = C \cdot F \cdot 47274,49$$

$$47274,49 \Rightarrow \quad \mathbf{92 \%}$$

$$\text{Ggl. 6.2: } Q_z = C \cdot F \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_{z/\text{CoCr}} = C \cdot F \cdot \left[ \left( \frac{1550}{100} \right)^4 - \left( \frac{900}{100} \right)^4 \right]$$

$$Q_{z/\text{CoCr}} = C \cdot F \cdot 57720,06 - 6561$$

$$Q_{z/\text{CoCr}} = C \cdot F \cdot 51159,06$$

$$51159,06 \Rightarrow \quad \mathbf{100 \%}$$

Die unter Glg. 6.1/6.2 geführte Berechnung zeigt, dass der ausgetauschte Wärmestrom  $Q_z$  der MOG – Legierungen mit 92 %, 8 % unter dem der EMF – Aufbrennlegierungen liegt. Der Temperaturgradient an der Grenzfläche Einbettmasse/Schmelze ist im Gegensatz zu den EMF – Aufbrennlegierungen reduziert. Der Schmelze wird bei den MOG – Legierungen aufgrund einer höher vorgewärmten Muffel (1000 °C) weniger Wärme von der Einbettmasse entzogen, was, wie bereits BARGET [7] nachgewiesen hat, eine verringerte Abkühlungsgeschwindigkeit und somit erhöhte Formfüllung der MOG – Legierungen bei einer um etwa +100 °C geführten Gießtemperatur nach sich zieht. Somit ist bewiesen, dass die hier untersuchten MOG – Legierungen WIRONIT, WIRONT LA sowie WIRONIUM PLUS bei etwa +100 °C GT höhere Formfüllungsraten aufweisen als die Legierungen WIROBOND C, WIROBOND LFC und WIRON 99.

### Beweisführung – Vergleich Einfluss der Vorwärm- und Gießtemperatur

Den Abbildungen 5.7 und 5.8 ist zu entnehmen, dass die Variation der Gießtemperatur einen größeren Einfluss auf die Formfüllung hat als die Veränderung der Muffeltemperatur, wobei HINMANN et al. den Einfluss von Vorwärm- und Gießtemperatur als gleichwertig betrachten [48].

Der größere Einfluss der Gießtemperatur im Vergleich zur Vorwärmtemperatur bezogen auf eine erhöhte Formfüllung der hier untersuchten EMF – Legierungen kann mit der physikalischen Formel zur Berechnung der Erstarrungszeit  $t_{\text{Erst}}$  (siehe Glg. 3.5) ermittelt werden. Dazu sei im Folgenden ein Rechenbeispiel aus der Wironit – Serie dargestellt, wobei folgende Angaben bekannt sind (aus Kap. 4/ Tbb. 4.3):

- $T_1$  Gießtemperatur Wironit 1550 °C (1460 °C + 90 °C GT – Anhebung)
- $T_2$  Liquidustemperatur Wironit 1350 °C
- $T_3$  Solidustemperatur Wironit 1320 °C
- $T_4$  Vorwärmtemperatur Wironit 1000 °C (Solltemperatur)

Die zur besseren Übersicht umgestellte Formel zur Berechnung der Erstarrungszeit  $t_{\text{Erst}}$  lautet wie folgt:

Glg. 6.3: 
$$t_{\text{Erst}} = \left[ \frac{T_1 - T_2}{T_3 - T_4} \right]^2 \cdot \left[ \frac{V}{O} \right]^2 \cdot \left[ \frac{L + C_{\text{Leg.}} \cdot \sigma_{\text{Leg.}}}{\sqrt{\lambda \cdot C_{\text{Form}} \cdot \sigma_{\text{Form}} \cdot 1,158}} \right]^2$$

Geht man von einer Konstanz der Prüfkörpergeometrie (gleich bleibendes Erstarrungsmodul  $M$ ) sowie der legierungs- und formspezifischen Faktoren unter gleichen Laborbedingungen während der Prüfkörperherstellung (Modellation, Gussvorbereitung, Guss) aus, so sind lediglich  $T_1 - T_4$  (in Glg. 6.3 schwarz hervorgehoben) für die Abschätzung der Erstarrungszeit relevant. Die Gleichung 6.4 zeigt die Berechnung der Erstarrungszeit  $t_{\text{Erst.Wironit/GT}}$  von WIRONIT bei einer um 90 °C erhöhten Gießtemperatur:

Glg. 6.4:

$$t_{\text{Erst.Wironit/GT}} = \left[ \frac{1550^{\circ}\text{C} - 1350^{\circ}\text{C}}{1320^{\circ}\text{C} - 1000^{\circ}\text{C}} \right]^2 \cdot [1]^2 \cdot [1]^2$$

$$t_{\text{Erst.Wironit/GT}} = 0,39 \text{ min}$$

Die Berechnung der Erstarrungszeit  $t_{\text{Erst.Wironit/VT}}$  von Wironit bei einer um 100 °C erhöhten Vorwärmtemperatur wird in Gleichung 6.5 dargelegt:

Glg. 6.5:

$$t_{\text{Erst.Wironit/VT}} = \left[ \frac{1460^{\circ}\text{C} - 1350^{\circ}\text{C}}{1320^{\circ}\text{C} - 1100^{\circ}\text{C}} \right]^2 \cdot [1]^2 \cdot [1]^2$$

$$t_{\text{Erst.Wironit/VT}} = 0,25 \text{ min}$$

$$t_{\text{Erst.Wironit/GT}} > t_{\text{Erst.Wironit/VT}}$$

Aus den Glg. 6.4 und 6.5 geht hervor, dass die Erstarrungszeit von Wironit bei einer GT – Anhebung um 90 °C mit 0,39 min. länger ist als bei der Anhebung der Vorwärmtemperatur – 0,25 min –. Analog können die Erstarrungszeiten von WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS sowie WIROBOND C, WIROBOND LFC und WIRON 99 im Vergleich Vorwärm- zu Gießtemperaturanhebung berechnet werden. Zum Vergleich der Erstarrungszeiten der sechs untersuchten EMF – Legierungen ist das Wissen über die thermischen – physikalischen Eigenschaften (Erstarrungswärme, spez. Wärmekapazität u. a.) der verwendeten Legierungen notwendig, ist jedoch nicht Gegenstand der obigen Berechnung, da innerhalb einer Legierungsart (hier: Wironit) verglichen wird. Beim Vergleich der Erstarrungszeiten verschiedener Legierungen müssten allerdings die legierungs- und formspezifischen Faktoren mit berücksichtigt werden.

Eine lange Erstarrungszeit bzw. verminderte Abkühlungsgeschwindigkeit bedeutet eine erhöhte Formfüllung. Somit ist bewiesen, dass in dem hier durchgeführten Ausfließtest die Gießtemperatur einen größeren Einfluss auf eine gesteigerte Formfüllung hat als eine erhöhte Formtemperatur.

### **6.2.1.3 Abschließende Betrachtungen**

Ein Vergleich der erzielten Versuchsergebnisse mit Ergebnissen anderer Untersuchungen scheint unmöglich. Verschiedene Prüfkörpergeometrien bzw. Testverfahren, die Verwendung unterschiedlicher Legierungstypen unter dem Einfluss verschiedenster Parameter lassen keinen objektiven Vergleich zu.

Zum einen ist ein gewisses Maß an Überhitzung des Schmelzgutes notwendig, um graze Strukturen wie sie in der Dentaltechnik Anwendung finden, formgetreu nachzubilden [48, 82]. Zum anderen beeinflusst die Überhitzung das Gefügebild negativ (grobkörnige Gefügestruktur mit Porositäten und Lunkern) und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften (Abnahme der physikalischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung, 0,2 % Dehngrenze) des einzugliedernden Zahnersatzes [66, 69, 73, 87]. Dem widersprechen die Ergebnisse von HESSELMANN [46], wonach eine variierende Muffel- und Gießtemperaturführung keine signifikanten Auswirkungen auf das Gefügebild sowie die mechanischen Legierungseigenschaften wie 0,2 % Dehngrenze und Härte haben.

Mit dem hier durchgeführten Ausfließtest konnte gezeigt werden, dass die Formfüllung der sechs vergossenen EMF – Legierungen durch Erhöhung der Vorwärm- sowie Gießtemperatur deutlich verändert werden kann.

### **6.3 Klinische Bedeutung des Ausfließtests**

Erhöhte Gießeigenschaften der Legierung sind eine Voraussetzung für die Herstellung von qualitativ hochwertigen dentalen Präzisionsgüssen. Eine dentale Restauration gilt als klinisch einsetzbar, wenn das Gussobjekt vollständig ausgeflossen ist. Besitzt eine Legierung ein nur sehr geringes Fließvermögen, so kommt die Schmelze beim Ausfüllen von dünnwandigen und komplizierten Formen zum Stillstand, bevor die Form vollständig ausgefüllt ist. Resultat ist das Auftreten von Gussfehlern, die im Nachhinein nicht mehr korrigiert werden können. Grundlage dabei ist ein in der indirekten Technik in Wachs modelliertes Objekt, das mittels festgelegter dentaler Verfahrensabläufe, das gewissen jedoch steuerbaren Schwankungen unterliegt, im zahntechnischen Labor hergestellt wird [112].

Mittels des hier vorgestellten quantitativen Tests können handelsübliche Dentallegierungen anhand des von HÄßELBARTH entwickelten Prüfkörpers [40] in ihrem Fließverhalten unter differenzierten Laborbedingungen quantitativ verglichen und bewertet werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, wie sensibel eine Legierung auf eine veränderte Vorwärm- und Gießtemperatur reagiert. Das lässt den Schluss zu, auf eine exakt eingestellte Gießtemperatur, wie es mit den heutigen hochmodernen Gießapparaturen (hier: Vakuumdruckgussgerät NAUTILUS CC der Fa. BEGO) mittels automatischer Gießzeitpunkterkennung möglich ist, zu achten. Wobei die korrekt eingestellte Gießtemperatur bedeutender für den Formfüllungsprozess und die endgültige dentale Restauration ist als die Formtemperatur. Das bedeutet für den Zahntechniker sich stets nach den Vorgaben des Herstellers des verwendeten Produktes zu richten.

Beim Guss von dünnwandigen dentalen Körpern (Teleskopkronen), die aufgrund ihrer im Verhältnis zum Volumen großen Oberfläche ein kleines Erstarrungsmodul  $M$  aufweisen, ist zu überlegen die Vorwärm- sowie Gießtemperatur nach oben zu korrigieren, um eine vollständige Konturwiedergabe (verbesserte Formfüllung) des zu gießenden Objektes zu gewährleisten. Jedoch darf das Ausmaß der veränderten Gefügestruktur sowie der mechanischen Eigenschaften nicht vernachlässigt werden.

Somit ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. Die hier gewonnenen Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen der gießtechnologischen Eigenschaft Formfüllung und den Prozeßparametern Vorwärm- und Gießtemperatur ermöglichen es, das Werkstoffpotenzial der EMF – Legierungen WIRONIT, WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS sowie WIROBOND C, WIROBOND LFC, WIRON 99 weiter auszuschöpfen, um die Qualität von dentalen Präzisionsgüssen weiter zu verbessern. Dabei stellt sich die Frage, ob es ein Maß bzw. Schwellenwert für eine gewisse Gieß- oder Vorwärmtemperaturerhöhung gibt, wo es weder zu Veränderungen im Gefügebild noch zur Herabsetzung mechanischer Parameter kommt. Zuvor sollte man eine Apparatur entwickeln, die die Herstellung identischer Prüfkörperrohlinge nach HÄßELBARTH gewährleistet, um das Fehlerausmaß bzw. Schwankungen des Erstarrungsmoduls zu minimieren. Das Auswerten der Prüfgitter über visuelles Auszählen vollständig ausgeformter Gitterkästchen sollte präzisiert werden (eine Auswertung mittels Abwiegen des Prüfgitters wäre denkbar [18]).

## 7 Zusammenfassung

Eine optimale Passgenauigkeit des Gussobjektes stellt eine Grundvoraussetzung zum Eingliedern einer qualitativ hochwertigen zahnärztlichen Restauration dar, was den Zahntechniker vor eine große Herausforderung stellt. Dabei nehmen die gießtechnologischen Eigenschaften Fließ- und Formfüllungsvermögen eine besondere Stellung ein.

Um den Einfluss der Prozessparameter Vorwärm- und Gießtemperatur auf das Ausfließverhalten dreier EMF – Legierungen für die Modellgusstechnik (WIRONIT, WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS; Fa. BEGO) sowie dreier EMF – Legierungen für die Kronen- und Brücken- Verblendtechnik (WIROBOND C, WIROBOND LFC, WIRON 99; Fa. BEGO) zu untersuchen, kam als spezielle Gießprobe der Prüfkörper nach HÄßELBARTH (modifiziertes Wachsretentionsgitter) zur Anwendung. Im Rahmen der Gießversuche wurden im Vakuum-Druckgussverfahren (NAUTILUS CC; BEGO, Bremen, Deutschland) aus den oben genannten sechs EMF – Legierungen in Serien à 6 Prüfkörpern insgesamt 180 Prüfgitter hergestellt, wobei zum einen die Muffeln zu heiß (+ 100 °C) bzw. zu kalt (- 100 °C) vorgewärmt wurden und zum anderen die Gießtemperaturen um + 100 °C erhöht sowie um - 100 °C reduziert wurden. Quantitativ verglichen wurden die Messergebnisse mit Güssen, die gemäß Herstellerangaben verarbeitet und vergossen wurden. Im Ergebnis wurde folgendes festgestellt:

- Der Testkörper nach HÄßELBARTH lässt eine quantitative Bewertung der hier vergossenen EMF – Legierungen unter Variation der Prozessparameter Vorwärm- und Gießtemperatur zu. Es wurden mittlere Formfüllungsraten zwischen 16 % und 86 % erzielt. Kein Gitter floss zu 0 % oder 100 % aus!
- Es zeigt sich eine legierungstypische Gruppenbildung. Die Modellgusslegierungen WIRONIT, WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS zeigen bei einer um + 100 °C geführten Gießtemperatur signifikant höhere Formfüllungsraten auf als die untersuchten EMF – Aufbrennlegierungen.

- Die Einstellung der Gießtemperatur ist für den Formfüllungsprozess bedeutender als Veränderungen der Muffeltemperatur, was sich mathematisch mit der Formel zur Berechnung der Erstarrungszeit  $t_{\text{Erst}}$  beweisen lässt.

Die hier erzielten Ergebnisse ermöglichen es, das Werkstoffpotential der sechs untersuchten EMF – Legierungen hinsichtlich einer verbesserten Formfüllung unter Variation der Vorwärm- und Gießtemperatur weiter auszuschöpfen, um die Qualität dentaler Präzisionsgüsse zu verbessern. Dabei dürfen jedoch Einbußen in der Qualität des Werkstücks (mechanische Eigenschaften wie Härte, 0,2 % Dehngrenze u. a.) nicht unberücksichtigt bleiben. Es stellt sich die Frage, ob es ein Maß bzw. Schwellenwert für eine gewisse Gieß- oder Vorwärmtemperaturerhöhung gibt, wo es weder zu Veränderungen im Gefügebild noch zur Herabsetzung mechanischer Parameter kommt? In erster Linie bedeuten die hier ermittelten Erkenntnisse für den Zahntechniker sich stets an die Vorgaben des Herstellers des verwendeten Produktes zu richten.

## 7.1 Summary

One of the major parameters that have to be considered when estimating and evaluating the quality of a high-value dental restoration is the optimal fitting accuracy of the die. This however, represents a huge challenge for dental technicians who have to regard many key features of technical casting, especially when it comes to aspects of fluidity and casting capacity.

In order to analyze the impact of the process parameters preheating – and casting temperature on the outflow characteristics of three EMF – alloys for partial dentures (WIRONIT, WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS; BEGO company) as well as of three PFM alloys (WIROBOND C, WIROBOND LFC, WIRON 99; BEGO company) this work applied a test specimen according to HÄßELBARTH (modified wax retention grid). In the context of the casting experiments with the non precious alloys mentioned above, a series of experiments has been conducted with a set of 6 test – specimen to produce a total of 180 testing meshes. During these tests the heating muffles have been preheated on the one hand intensely at +100 °C and on the other hand lowly at -100 °C. Furthermore, the casting temperature has been risen to +100 °C as well as lowered to a minimum of - 100°C. The tests conducted were compared to results that were made according to manufacturer instructions. Concluding the analysis of the results:

- The reference block according to HÄßELBARTH allows the quantitative comparison of the used non precious alloys with varying process parameters such as preheating – and casting temperatures. Within the experiments intermediate form – filling rates between 16 % – 86 % have been achieved. No test mesh poured out to either 0 % or 100 %!
- The experiments revealed a typical grouping of the alloys according to their formation. At a temperature of +100 °C the EMF – alloys for partial dentures WIRONIT, WIRONIT LA, WIRONIUM PLUS showed significantly higher form – filling rates than the analyzed PFM alloys.

- The configuration of the casting temperature is by far more important to the form filling process than the variation of the muffle temperature. This can be proven mathematically by the formula for the calculation of the cooling time  $t_{\text{Erst}}$ .

The results gained from this work show that the construction materials used in the EMF – alloys have a huge potential that can be further exploited in terms of better form fillings through the optimization of preheating and casting temperatures during the casting process. That is why dental precision castings can be improved dramatically. However, other factors that affect the quality of the component parts such as the mechanical characteristic hardness or elastic limit of 0,2 % should not be neglected. The question remains open whether there is a way to estimate the optimal marginal value or proportion that manages to avoid affecting the texture and degrading mechanical parameters of the component parts while casting and preheating temperatures are changed. First and foremost the here gathered information confirm and imply that dental technicians should always stick to the specifications of manufacturers.

**8 Literaturverzeichnis**

- 1 Agarwal DP, Ingersoll W. Evaluation of various castability patterns by comparison with practical castings. J Dent Res 1982; 61/abstract 1502: 351.
- 2 Ariely E, Gilde H, Overdiek HF. Beitrag zur Verbesserung der Paßgenauigkeit von Gussfüllungen nach indirekter Abdrucktechnik. Dtsch Zahnärztl Z 1984; 39: 299-303.
- 3 Asgar K. Melting and casting of alloys. In: Valega T, Alternatives to gold alloys in dentistry. US Departement of Health, Educatin, and Welfare. NIH Publ 1977; No 77-1227: 166-185.
- 4 Asgar K, Arfaei AH. Castability of crown and bridge alloys. J Prosth Dent 1985; 54 (1): 60-63.
- 5 Asgar K, Peyton FA. Effect of microstructure on the physical properties of cobalt-base alloys. J Dent Res 1961 Jan-Feb; 40 (1): 63-72.
- 6 Asgar K, Peyton FA. Pits on the inner surfaces of cast gold crowns. J Prosth Dent 1959; 9: 448-456.
- 7 Barget R. Zum Vortrag: Vergleichende Untersuchung von Dental-Legierungen und Gießmethoden. Dent Lab 5/1983; 31: 609-610.
- 8 Barreto MT, Goldberg AJ, Nitkin DA, Mumford G. Effect of investment on casting high-fusing alloys. J Prosth Dent 11/1980; 44 (5): 504-507.
- 9 BEGO Bremer Goldschlägerei. Informationsblatt Wironit. Bremen, 2006/2007.
- 10 BEGO Bremer Goldschlägerei. Informationsblatt Wironit LA. Bremen, 2006/2007.

- 11 BEGO Bremer Goldschlägerei. Informationsblatt Wironium Plus. Bremen, 2006/2007.
- 12 BEGO Bremer Goldschlägerei. Informationsblatt Wirobond C. Bremen, 2006/2007.
- 13 BEGO Bremer Goldschlägerei. Informationsblatt Wirobond LFC. Bremen, 2006/2007.
- 14 BEGO Bremer Goldschlägerei. Informationsblatt Wiron 99. Bremen, 2006/2007.
- 15 BEGO Bremer Goldschlägerei. Informationsblatt Nautilus CC. Bremen, 2006/2007.
- 16 Belohlavek H. In Super-Zeitlupe: Die Vorgänge beim Druck- und Schleuderguss. Dent Lab 7/1981; 1049-1052.
- 17 Bergmann W. Werkstofftechnik 2: Werkstoffherstellung – Werkstoffverarbeitung – Werkstoffanwendung. 3. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2002.
- 18 Bernsdorff KH. Prüfung der Fließbarkeit von Palladium-Basis-Dental-Guss-Legierungen. Freiburg: Zahnmed Diss 1991.
- 19 Bessing C. Evaluation of the castability of four different alternative alloys by measurement the marginal sharpness. Acta Odontol Scand 1986; 44: 165-172.
- 20 Bezzon OL, Ribeiro RF et al. Effect of beryllium on the castability and resistance of ceramometal bonds in nickel-chromium alloys. J Prosth Dent 1998; 80 (5): 570-574.
- 21 Böhme U. Legierungen in der Zahnheilkunde – Zusammensetzung und Unterschiede (1-4). Firma C. Hafner, Pforzheim. DZW Zahntechnik 2001; 11-14/01: 3-9.

- 22 Brockhurst PJ, McLaverty VG, Kasloff Z. A castability standard for alloys used in restorative dentistry. *Oper Dent* 1983; 8: 130-139.
- 23 Brunnhuber E. *Gießerei-Lexikon*. Ausgabe 1988. 14. Auflage. Berlin: Fachverlag Schiele & Schön, 1987.
- 24 Bucksch H. *Wörterbuch der Zahnmedizin und Zahntechnik: dt-eng, eng-dt*. Stuttgart: Hüthig Verlag, 2000.
- 25 Bundesvereinigung, Kassenzahnärztliche. *Das Dental Vademekum 2009/2010*. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag, 2009.
- 26 Capadona JA, Albright DL. Review of fluidity testing as applied to lost-polystyrene investment casting. *AFS Trans* 1979; 78: 43.
- 27 Carreiro AFP, Ribeiro RF, Mattos MGC et al. Evaluation of the castability of a Co-Cr-Mo-W alloy varying the investing technique. *Braz Dent J* 2005; 16 (1): 50-55.
- 28 Civjan S, Huget EF, Dvidedi N et al. Further studies on gold alloys used in fabrication of porcelain-fused-to-metal restorations. *J Am Dent Assoc* 1975; 90: 659.
- 29 Cohen S, Tanabe N, Vaidyanathan TK. Castability quantification by image analysis of mesh monitor castings. *J Dent Res* 1988; 67: 173 (abstract 485).
- 30 Cooper A. Spruing technique minimizes problems of thin casting. *Dent Lab Rev* 1977; 52: 20.
- 31 DeWald E. The relationship of pattern position to the flow of gold and casting completeness. *J Prosth Dent* 5/1979; 41 (5): 531-534.
- 32 Dörfler B, Fleetwood P, Fischer J. Prüfung dentaler Edelmetall-Gusslegierungen. *Quintessenz Zahntech* 1995; 21: 813-824.

- 33 Dudek RP, Tesk JA. Evaluation of alternative alloys to type III gold for use in fixed prosthodontics: Critical of techniques. J Am Dent Assoc 1977; 94: 24.
- 34 Eames WB, MacNamara JF. Evaluation of casting machines for ability to cast sharp margins. Oper Dent 1978; 3: 137-141.
- 35 Fritz AH, Schulze G. Fertigungstechnik. 9. Auflage. Heidelberg: Springer Verlag, 2010.
- 36 Fuhrer S. Die Schweizerische Medizinprodukteverordnung. Schweiz Monatsschr Zahnmed 1998; 108: 1118-1121.
- 37 Geis-Gerstorfer J. Nichtedelmetalllegierungen. In: Eichner K (Hrsg). Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, Bd 1, 7. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2000: 119-167.
- 38 Grunberg B, Lutz O. Model constriction, wax up, and casting for quality fixed restorations (II). Quintessenz Dent Technol 1985; 9: 155-158.
- 39 Gundlach HW. Einbettmassen. In: Eichner K (Hrsg). Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, Bd 1, 7. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2000: 34-58.
- 40 Hässelbarth S. Entwicklung eines Prüfkörpers zur Quantifizierung des Ausfließverhaltens von Kobalt – Chrom – Legierungen und dessen Anwendung bei verschiedenen Gussverfahren. Berlin, FU: Zahnmed Diss 2005.
- 41 Haraszthy G, Weber H. Die Vergießbarkeit einer NEM – und zweier edelmetallreduzierter Legierungen. Dent Lab 11/1983; 31: 1381-1382.
- 42 Hasse S. Foundry Technologies & Engineering GmbH, Rheinweg 9, 8200 Schaffhausen/Schweiz. Giessereilexikon. [www.giessereilexikon.com](http://www.giessereilexikon.com).

- 43 Hero H. The mould-filling capacity of two casting alloys. *J Mater Sci Mater Med* 1990; 1: 94-99.
- 44 Hero H. Effects of casting temperature on some properties of Co-Cr-Mo dental casting alloys. *Acta Odontol Scand* 1984; 42: 371-377.
- 45 Hero H, Waarli M. Effect of vacuum and supertemperature on mold filling during casting. *Scan J Dent Res* 1991; 99: 55-59.
- 46 Hesselmann C. Einfluss von Vorwärm- und Gießtemperaturen auf mechanische Parameter von Kobalt-Chrom-Legierungen. Berlin, FU: Zahnmed Diss 2003.
- 47 Hielscher W, Hohmann A. Lehrbuch der Zahntechnik, Bd 3. Berlin: Quintessenz Verlag, 1987.
- 48 Hinman RW, Tesk JA, Whitlock RP, et al. Use of a castability test for optimizing mold and casting temperature. *J Dent Res* 1982; 61: 329 (abstract 1361).
- 49 Hinman RW, Tesk JA, Whitlock RP, et al. A technique for characterizing casting behaviour of dental alloys. *J Dent Res* 1985; 64: 134.
- 50 Hirano S, Tesk JA, Höpfner TP. Castability of non precious alloys as a function of composition. *J Dent Res* 1984; 63: 176 (abstract 54).
- 51 Hoffmann-Axthelm W. Lexikon der Zahnmedizin, 6. Auflage. Berlin: Quintessenz Verlag, 2000.
- 52 Hohmann W. Eignungswertung von Dentalgußwerkstoffen. *Dtsch Zahnärztl Z* 1986; 41: 1117-1120.
- 53 Howard WS, Newman SM. Castability of low gold content alloys. *J Dent Res* 5/1980; 59 (5): 824-830.

- 54 Ida K, Daita K, Otani H, et al. Studies fundamental and practical factors in dental castings, Part II. Solidification time. J Osaka Univ Dent Sch 1969; 9: 49-61.
- 55 Inaba H. (Part 1) Testing apparatus of fluidity in high temperature. In: The fluidity of alloys in high temperature. J Jap Soc for Dent App and Mat 22 (57); 37-44.
- 56 Inaba H. (Part 2) The fluidity of 20 % Au-Ag-Pd-Cu alloy. In: The fluidity of alloys in high temperature. J Jap Soc for Dent App and Mat 22 (57); 45-50.
- 57 Ingersoll N. Troubleshooting casting technical problems for dental alloys to which porcelain will be fused. J Prosth Dent 1972; 28: 439-441.
- 58 ISO. Third Draft proposal for international standards for dental base metal casting alloys. Nov 1977.
- 59 Jarvis RH, Jenkins TJ, Tedesco LA. A castability study of non precious ceramometal alloys. J Prosthet Dent 04/1984; 51 (4): 490-494.
- 60 Johnson A, Winstanley R. The evaluation of factors affecting the castability of metal ceramic alloy – investment combinations. Int J Prosthodont 1996; 9: 74-86.
- 61 Kaminski RA, Anusavice KJ, Okabe T, et al. Castability of silver-based crown and bridge alloys. J Dent Res 1983; 62: 287 (abstract 1061).
- 62 Kappert H. Probleme der Gußtechnik aus werkstoffkundlicher Sicht. Zahnärztl Mitt 1986; 76: 2305-2314.
- 63 Körber K, Ludwig K. Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 1982.
- 64 Kreutzner H. Der Vakuum-Druckguss in der Zahntechnik, Gießfehler und wie man sie vermeiden kann. Dent Lab 1984; 32: 539-543.

- 65 Lacefield WR, O'Neal SJ, Mullins N. Castability of selected crown and bridge alloys. *J dent Res* 1983; 62: 287 (abstract 1062).
- 66 Lindigkeit J. NEM – Legierungen in der Metallkeramik. *Phillip J* 1986; 3: 52.
- 67 Luk HWK, Darvell BW. Casting system effectiveness – measurement and theory. *Dent Mater* 03/1992; 8: 89-99.
- 68 Marxkors R, Meiners H. Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde, 5. Auflage. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2005.
- 69 Meurerer E, Siebert GK, Lehmann KM. Änderungen des Gefüges und der Mikrohärtigkeit bei Aufbrennlegierungen in Abhängigkeit von der Zahl der Wärmebehandlungen. *Zahnärztl Welt* 1987; 96: 8.
- 70 Meyer JM, Boulefa A, Ribaux JD. Castability tests for non precious alloys. *J Dent Res* 1985; 64: 351 (abstract 1587).
- 71 Mimura H, Nakai A. Effects of Co, Mo and Cu on fluidity of 80Ni-20Cr alloy. *J Jap Soc Dent Mater/ Devices* 03/1989; 8 (2): 231-241.
- 72 Mitchell RJ, Kemper JT. Castability of Ni-Cr alloys using a fine-gauge mesh test. *J Dent Res* 1984; 63: 176 (abstract 52).
- 73 Morris HF. The influence of heat treatments on several types of basemetal removable partial denture alloys. *J Prosth Dent* 1979; 41: 388.
- 74 Myers RE. Observations of the behaviour of molten metal during casting. *J Dent Res* 1933; 275-278.
- 75 Naylor WP, Moore BK, Phillips RW, et al. Comparison of two tests to determine the castability of dental alloys. *Int J Prosthodont* 1990; 3 (5): 413-424.

- 76 Nielsen J, Shalita S. Margin casting monitor. *J Dent Res* 1977; 56: B213 (abstract 645).
- 77 Nitkin DA, Asgar R. Evaluation of alternative alloys to type III gold for use in fixed prosthodontics. *J Am Dent Assoc* 1976; 93: 622.
- 78 Okamura H. Flow of molten metal in denture base in horizontal centrifugal casting procedure, Part 2. *J.D.A.A.* 1978; 19: 254-270.
- 79 Oliveira PCG, Adabo GL, Ribeiro RF, et al. The effect of mold temperature on castability of CP Ti and Ti-6Al-4V castings into phosphate bonded investment materials. *Dent Mater* 2006; 22: 1098-1102.
- 80 Paulino SM, Leal MB, Pagnano VO, et al. The castability of pure titanium compared with Ni-Cr and Ni-Cr-Be alloys. *J Prosth Dent* 12/2007; 98 (6): 445-454.
- 81 Pews-Hocke C. *Formeln und Tabellen*, 1. Auflage. Berlin: Gesellschaft für Bildung und Technik mbH, 1993.
- 82 Pines M, Nielsen J, Vaidyanathan TK, et al. Casting variables and margin reproduction of dental alloys. *J Dent Res* 1980; 59: 473 (abstract 825).
- 83 Plate EJ. *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*. Berlin, Ernst & Sohn Verlag, 1993.
- 84 Polianska O. *Technologische Erfordernisse beim Aluminium-Dünnwand-Kokillengießen*. Universität Magdeburg: Diss, 2010.
- 85 Presswood RG. The castability of alloys for small castings. *J Prosth Dent* 07/1983; 50 (1): 36-39.
- 86 Preston JD, Berger R. Some laboratory variables affecting ceramo-metal alloys. *Dent Clin North Am* 1977; 21 (4): 717-728.

- 87 Rau G, Ströbel R. Die Metalle: Werkstoffkunde mit ihren chemischen und physikalischen Grundlagen, 19. Auflage. München: Verlag Neuer Merkur GmbH, 2004.
- 88 Rawson RD, Gregory GG, Lund MR. Photographic study of gold flow. *J Dent Res* 1972; 51: 1331.
- 89 Reagan SE, Kois JC. A practical study of the castability of dental alloys: Effects of investment and burnout temperature. *Quintessenz Zahntech* 11-12/1985; 9 (10): 667-671.
- 90 Rieger MR, Tanquist RA, Vainer S. The effect of a new sprue design on the castability of a base-metal alloy. *J Prosth Dent* 06/1986; 55 (6): 686-690.
- 91 Ruge J, Wohlfahrt H. Technologie der Werkstoffe – Herstellung Verarbeitung Einsatz –, 8. Auflage. Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- 92 Satoh Y, Miyata M, Ono F, et al. Studies on the castability of Co-Cr alloy for cast plates. Part 1: The effect of sprue attachment direction to wax plates and the investment direction of refractory models. Part 2: Effect of form of sprue attachment to the wax pattern. *J Nihon Univ Sch Dent* 03/1990; 32 (1): 27-34.
- 93 Sauer G. Vergleichende Untersuchung von vier Dental-Legierungen unter Berücksichtigung von zwei Gießmethoden. *Dtsch Zahnärztl Z* 1982; 37: 975-981.
- 94 Schaffer SP. Effects of alloying additions on the castability of Pd-Cu-Ga alloys. *J Dent Res* 1984; 63: 176 (abstract 51).
- 95 Schorn GH. MPG Medizinproduktegesetz, 2. Auflage. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, 1998.
- 96 Showman RE, Aufderheide RC. Ein Verfahren zur Herstellung von dünnwandigen Sandgussstücken. *Giesserei-Praxis* 5/2004; 198-204.

- 97 Siebert GK. Dentallegierungen in der zahnärztlichen Prothetik. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1989.
- 98 Smith D, Cowart J, Fairhurst C, et al. A study of the casting of non precious alloys. J Dent Res 1977; 56: B213 (abstract 646).
- 99 Smith CD, Deckman J, Fairhurst CW. An alloy castability and adaption test. J Dent Res 1980; 59: 349 (abstract 328).
- 100 Spasski AG. Grundlagen des Giessereibetriebes. Leipzig: Fachbuchverlag, 1955.
- 101 Strickland WD, Sturdevant CM, Hill NC. Porosity in the full cast crown. J Am Dent Assoc 1959; 58: 69.
- 102 Strietzel R. Die Werkstoffkunde der Metall-Keramik-Systeme, 1. Auflage. München: Neuer Merkur Verlag, 2005.
- 103 Strietzel R. Quintessenz der Dentallegierungen. Quintessenz Zahntech 1998; 24 (5): 509-517.
- 104 Strietzel R. Aufbrennfähige NEM-Legierungen für LFC-Massen. Dent Lab 10/2001: 1687-1693.
- 105 Stroppe H. Physik für Studenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften, 13. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2005.
- 106 Stümke M. Einführung in die Metallkunde. In: Eichner K (Hrsg). Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, Bd 1, 7. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2000: 63-85.
- 107 Stümke M. Edelmetall-Legierungen. In: Eichner K (Hrsg). Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, Bd 1, 7. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2000: 89-113.

- 108 Susz C, Meyer JM, Barraud R, et al. Quantifizierung des Fließvermögens von Dentallegierungen. Dent Lab 1996; 10: 1627-1635.
- 109 Takahashi J, Zhang J, Okazaki M. Effect of casting methods on castability of pure titanium. Dent Mater J 12/1993; 12 (2): 245.
- 110 Tangsgoolwatana J, Oda Y, Sumii T. The pattern design for evaluation of castability of nickel-chromium alloys. Bull Tokyo Dent Coll 05/1990; 31 (2): 117 (abstract).
- 111 Taschner C. Die räumliche und zeitliche Erfassung des Temperaturverlaufs während des Erstarrens einer dentalen Goldlegierung. Freiburg: Med Diss 1987.
- 112 Thomson DH. A study of the effect of an increased mold temperature on the casting ability of some non precious alloys for porcelain veneers. J Prosth Dent 7/1982; 48 (1): 52-58.
- 113 Vaidyanathan TK, Penugonda B. Comparative evaluation of two popular castability monitors. J Dent Res 1985; 64: 351 (abstract 1589).
- 114 Vaidyanathan TK, Schulman A, Nielsen JP, et al. Correlation between macroscopic porosity location and liquid metal pressure in centrifugal casting technique. J Dent Res 1981; 60: 59.
- 115 Verrett RG, Duke ES. The effect of sprue attachment design on castability and porosity. J Prosth Dent 4/1989; 61 (4): 418-424.
- 116 Vincent PF, Stevens L, Basford KE. A comparison of the casting ability of precious and non precious alloys for porcelain veneering. J Prosth Dent 1977; 37: 527-536.
- 117 Voß R. Zu speziellen Fragen der Gußtechnik. DZZ 1967; 10: 1220-1227.

- 118 Voß R, Meiners H. Fortschritte der Zahnärztlichen Prothetik und Werkstoffkunde, Bd 3. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1987.
- 119 Voß R, Meiners H. Fortschritte der Zahnärztlichen Prothetik und Werkstoffkunde, Bd 4. München, Wien: 1989.
- 120 Wagner E. Beitrag zum Präzisionsgußverfahren. DZZ 1967; 10: 1215-1219.
- 121 Wakasa K, Yamaki M. The castability of ternary Ni-Cu-Mn alloys for crown and bridge applications. J Mater Sci Mater Med 1990; 1: 90-93.
- 122 Watanabe K, Miyakawa O, Takada Y, et al. Casting behaviour of titanium alloys in a centrifugal casting machine. Biomaterials 2003; 24: 1737-1743.
- 123 Watanabe I, Woldu M, Watanabe K, et al. Effect of casting method on castability of titanium and dental alloys. J Mater Sci Mater Med 2000; 11: 547-553.
- 124 Weber H. Experimentelle Untersuchungen und theoretische Überlegungen zum Vergießen von aufbrennfähigen Nickel-Chrom-Legierungen. Dtsch Zahnärztl Z 1981; 36: 15-19.
- 125 Weber H. Zur Vergießbarkeit von Dentallegierungen unter Berücksichtigung der aufbrennfähigen Ni-Cr-Legierungen. Dtsch Zahnärztl Z 1979; 34: 527-531.
- 126 Weber H. Betrachtungen und Hinweise zum Guss edelmetallfreier Legierungen. Quintessenz Zahntech 10/1983; 10: 1075-1081.
- 127 Wöllmer H. Untersuchung zum Präzisionsgießen metallischer Mikroteile. Uni Freiburg: Diss, 2000.
- 128 Zhang Y, Guo T, Li Z. Effects of the mold temperature on the castability of titanium zirconium alloy for dental clinical use. West China J Stomat 6/2001; 19 (3): 178.

- 
- 129 Zukunft D. Spezielle Metallkunde für Zahntechniker, 3. Auflage. Berlin: Ullstein Mosby, 1993.

## 9 Anhang

### 9.1 Ergebnisse der Ausfließtests der Modellgusslegierungen

#### 9.1.1 Versuchsergebnisse der Wironit – Serie

Variation der Vorwärmtemperatur -100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

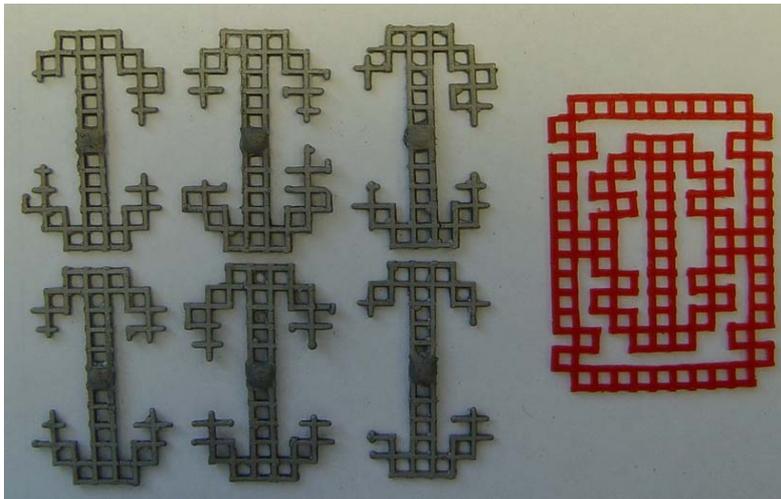


Abb. 9.1: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1460 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	21	26,58
2	20	25,32
3	20	25,32
4	18	22,78
5	20	25,32
6	19	24,05
<b>Mittelwert</b>	19,67	<b>24,89</b>
<b>Median</b>	20	<b>25,32</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,98	<b>0,98</b>
<b>Standardabweichung</b>	0,94	<b>1,19</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	1,06	<b>1,71</b>

Tab. 9.1: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1460 °C)

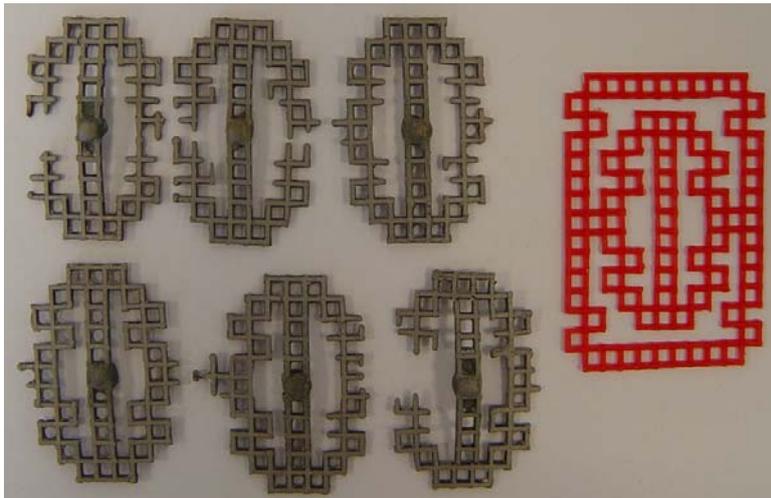
Vorwärmtemperatur/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

Abb. 9.2: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1460 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	26	32,91
2	27	34,18
3	33	41,77
4	27	34,18
5	22	27,85
6	23	29,11
<b>Mittelwert</b>	26,33	<b>33,33</b>
<b>Median</b>	26,5	<b>33,54</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,99	<b>0,99</b>
<b>Standardabweichung</b>	3,54	<b>4,49</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	15,06	<b>24,14</b>

Tab. 9.2: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1460 °C)

Variation der Vorwärmtemperatur +100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

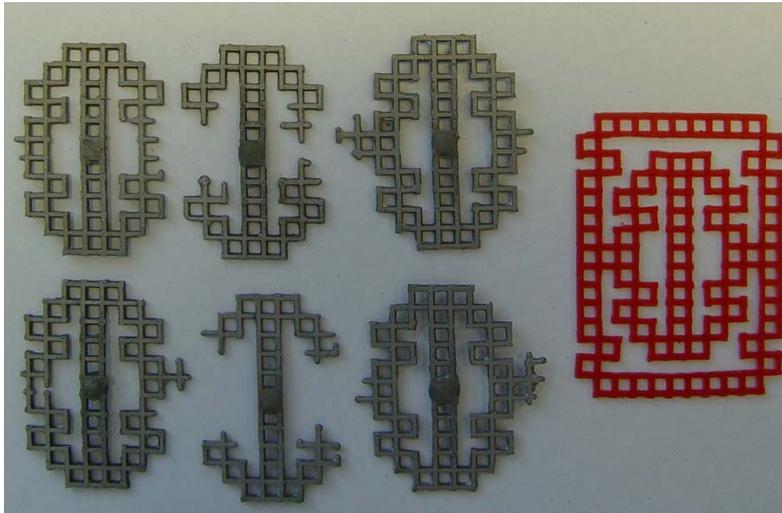


Abb. 9.3: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1100 °C/ Gießtemperatur 1460 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	29	36,71
2	34	43,04
3	24	30,38
4	30	37,97
5	34	43,04
6	20	25,32
<b>Mittelwert</b>	28,50	<b>36,08</b>
<b>Median</b>	29,5	<b>37,34</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,96	<b>0,96</b>
<b>Standardabweichung</b>	5,09	<b>6,44</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	31,1	<b>49,83</b>

Tab. 9.3: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1100 °C/ Gießtemperatur 1460 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur -100 °C

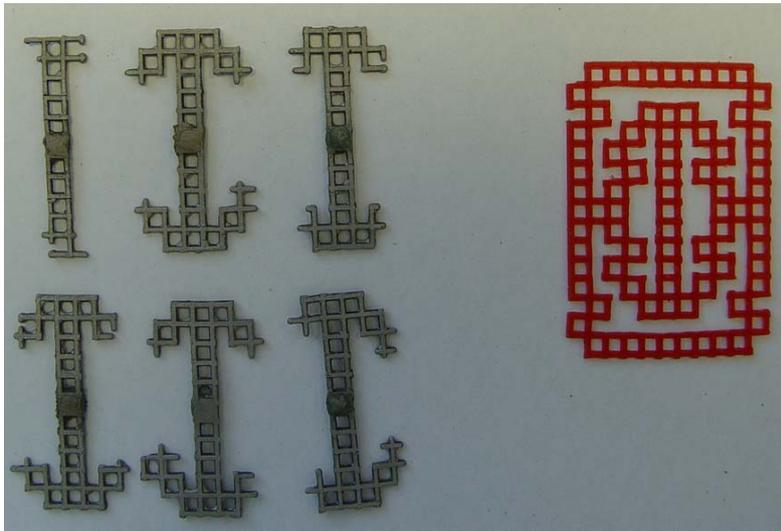


Abb. 9.4: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1360 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	17	21,52
2	10	12,66
3	19	24,05
4	19	24,05
5	15	18,99
6	17	21,52
<b>Mittelwert</b>	16,17	<b>20,46</b>
<b>Median</b>	17	<b>21,52</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,95	<b>0,95</b>
<b>Standardabweichung</b>	3,08	<b>3,90</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	11,36	<b>18,21</b>

Tab. 9.4: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1360 °C)

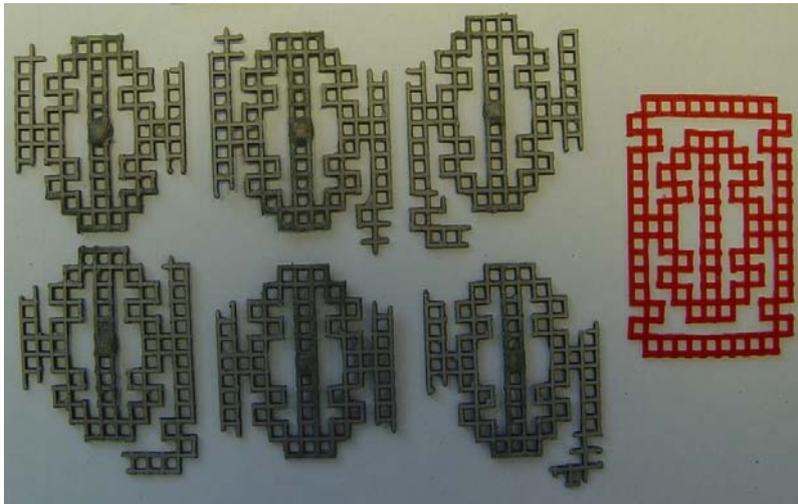
Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur +90 °C

Abb. 9.5: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	50	63,29
2	47	59,49
3	53	67,09
4	44	55,70
5	50	63,29
6	45	56,96
<b>Mittelwert</b>	48,17	<b>60,97</b>
<b>Median</b>	48,5	<b>61,39</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,99	<b>0,99</b>
<b>Standardabweichung</b>	3,13	<b>3,96</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	11,76	<b>18,85</b>

Tab. 9.5: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

### 9.1.2 Versuchsergebnisse der Wironit LA – Serie

Variation der Vorwärmtemperatur -100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

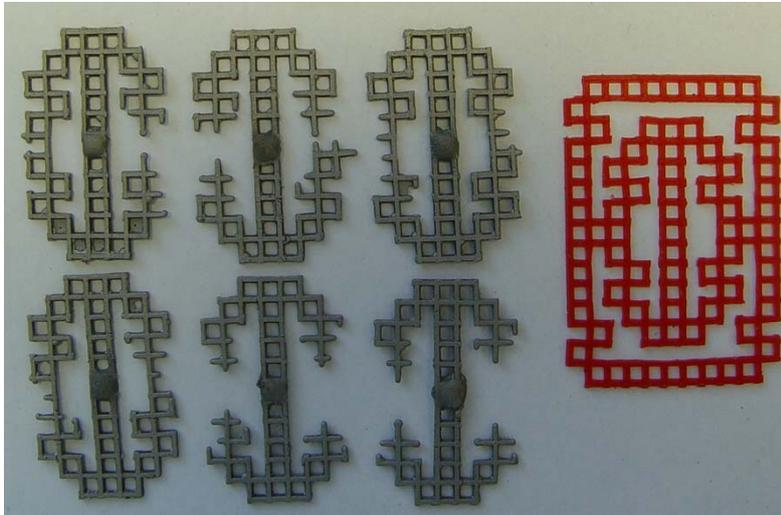


Abb. 9.6: Prüfritze (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	27	34,18
2	27	34,18
3	24	30,38
4	20	25,32
5	27	34,18
6	20	25,32
<b>Mittelwert</b>	24,17	<b>30,59</b>
<b>Median</b>	25,5	<b>32,28</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,94	<b>0,94</b>
<b>Standardabweichung</b>	3,13	<b>3,96</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	11,76	<b>18,85</b>

Tab. 9.6: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Vorwärmtemperatur/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

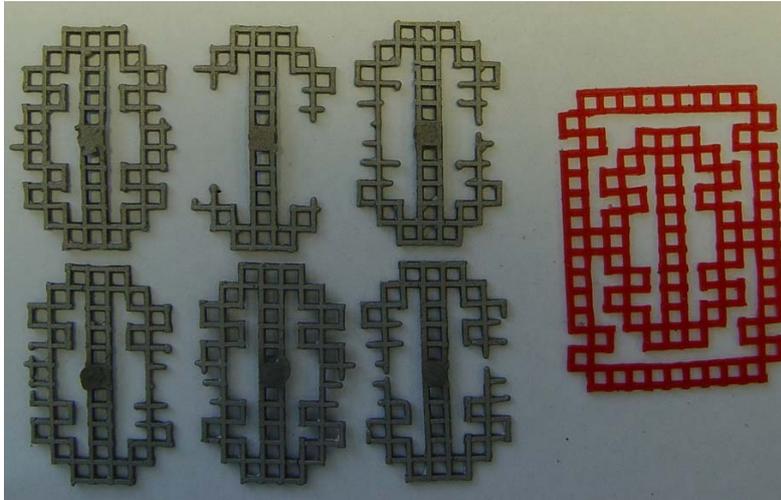


Abb. 9.7: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	23	29,11
2	25	31,65
3	29	36,71
4	26	32,91
5	32	40,51
6	20	25,32
<b>Mittelwert</b>	25,83	<b>32,70</b>
<b>Median</b>	25,5	<b>32,28</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,01	<b>1,01</b>
<b>Standardabweichung</b>	3,89	<b>4,93</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	18,16	<b>29,11</b>

Tab. 9.7: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Variation der Vorwärmtemperatur +100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

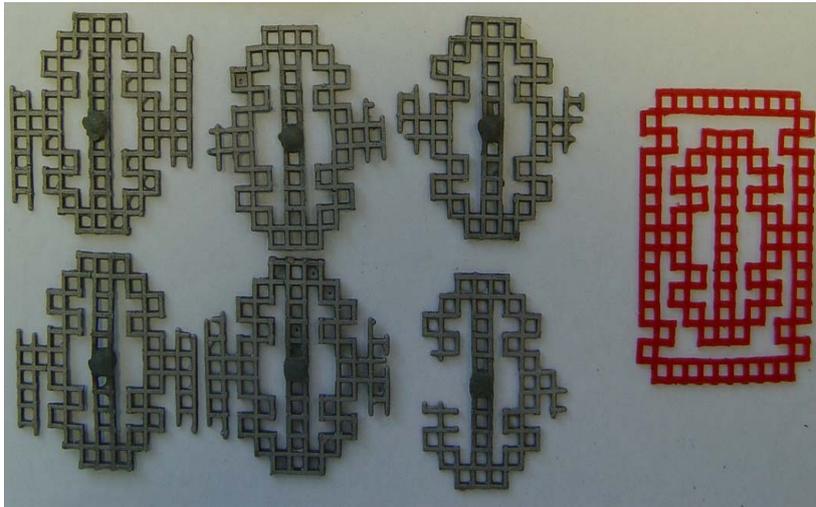


Abb. 9.8: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1100 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	30	37,97
2	43	54,43
3	36	45,57
4	45	56,96
5	36	45,57
6	40	50,63
<b>Mittelwert</b>	38,33	<b>48,52</b>
<b>Median</b>	38	<b>48,10</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,01	<b>1,01</b>
<b>Standardabweichung</b>	4,99	<b>6,32</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	29,86	<b>47,85</b>

Tab. 9.8: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1100 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur -100 °C

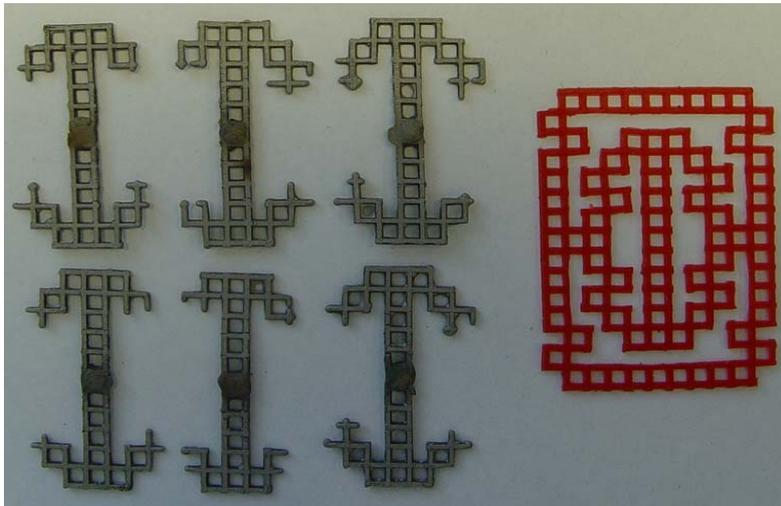


Abb. 9.9: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1350 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	19	24,05
2	18	22,78
3	19	24,05
4	16	20,25
5	19	24,05
6	17	21,52
<b>Mittelwert</b>	18,00	<b>22,78</b>
<b>Median</b>	18,5	<b>23,42</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,97	<b>0,97</b>
<b>Standardabweichung</b>	1,15	<b>1,46</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	1,6	<b>2,56</b>

Tab. 9.9: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1350 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur +100 °C

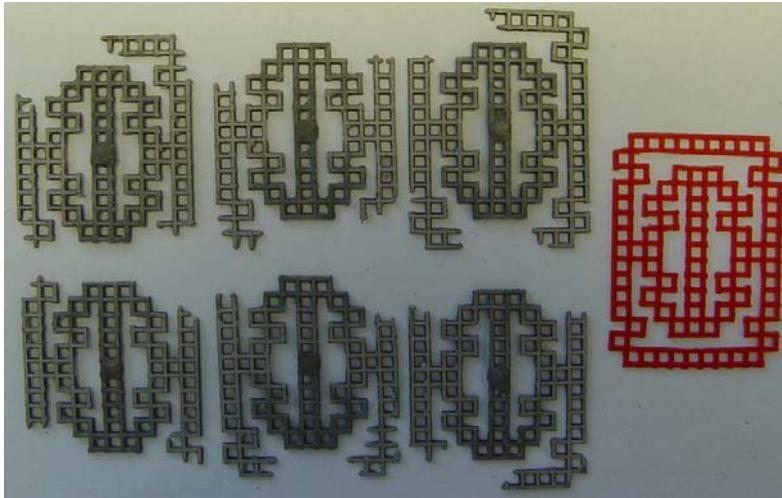


Abb. 9.10: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	64	81,01
2	51	64,56
3	51	64,56
4	53	67,09
5	55	69,62
6	55	69,62
<b>Mittelwert</b>	54,83	<b>69,41</b>
<b>Median</b>	54	<b>68,35</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,01	<b>1,01</b>
<b>Standardabweichung</b>	4,41	<b>5,59</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	23,36	<b>37,44</b>

Tab. 9.10: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

### 9.1.3 Versuchsergebnisse der Wironium Plus – Serie

Variation der Vorwärmtemperatur -100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

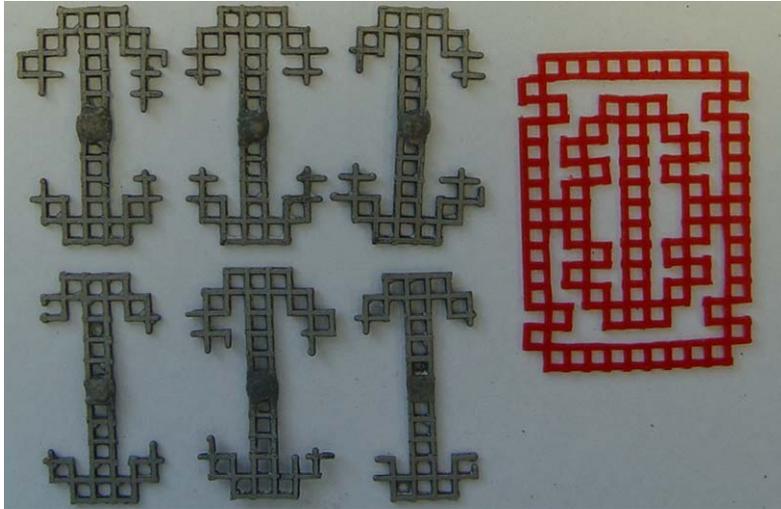


Abb. 9.11: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1440 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	19	24,05
2	19	24,05
3	20	25,32
4	17	21,52
5	18	22,78
6	19	24,05
<b>Mittelwert</b>	18,67	<b>23,63</b>
<b>Median</b>	19	<b>24,05</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,98	<b>0,98</b>
<b>Standardabweichung</b>	0,94	<b>1,19</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	1,06	<b>1,71</b>

Tab. 9.11: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1440 °C)

Vorwärmtemperatur/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

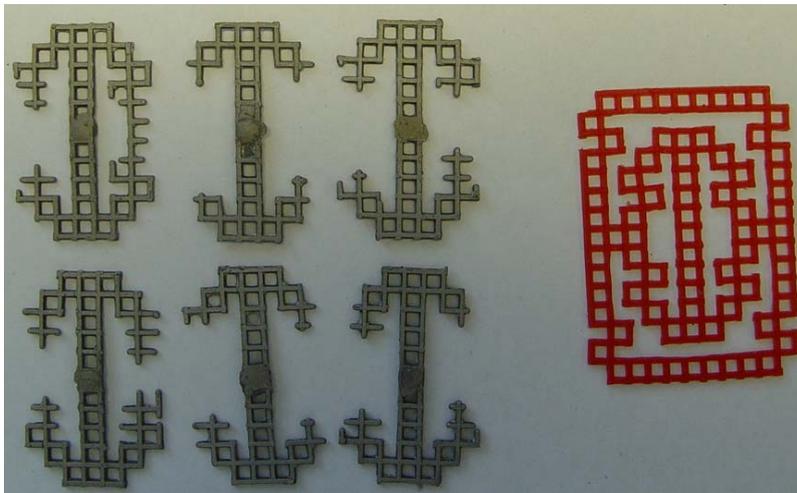


Abb. 9.12: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1440 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	19	24,05
2	21	26,58
3	19	24,05
4	20	25,32
5	19	24,05
6	21	26,58
<b>Mittelwert</b>	19,83	<b>25,11</b>
<b>Median</b>	19,5	<b>24,68</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,01	<b>1,01</b>
<b>Standardabweichung</b>	0,90	<b>1,14</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	0,96	<b>1,54</b>

Tab. 9.12: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1440 °C)

Variation der Vorwärmtemperatur +100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

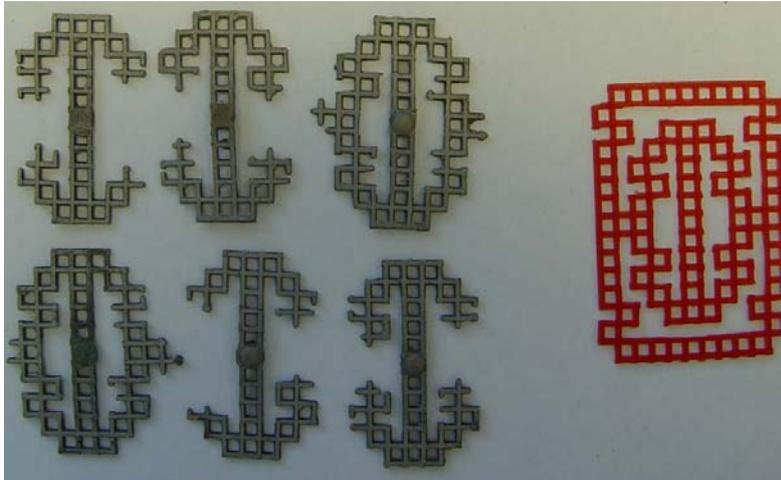


Abb. 9.13: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1100 °C/ Gießtemperatur 1440 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	22	27,85
2	19	24,05
3	21	26,58
4	31	39,24
5	21	26,58
6	30	37,97
<b>Mittelwert</b>	24,00	<b>30,38</b>
<b>Median</b>	21,5	<b>27,22</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,11	<b>1,11</b>
<b>Standardabweichung</b>	4,69	<b>5,94</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	26,4	<b>42,3</b>

Tab. 9.13: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1100 °C/ Gießtemperatur 1440 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur -100 °C

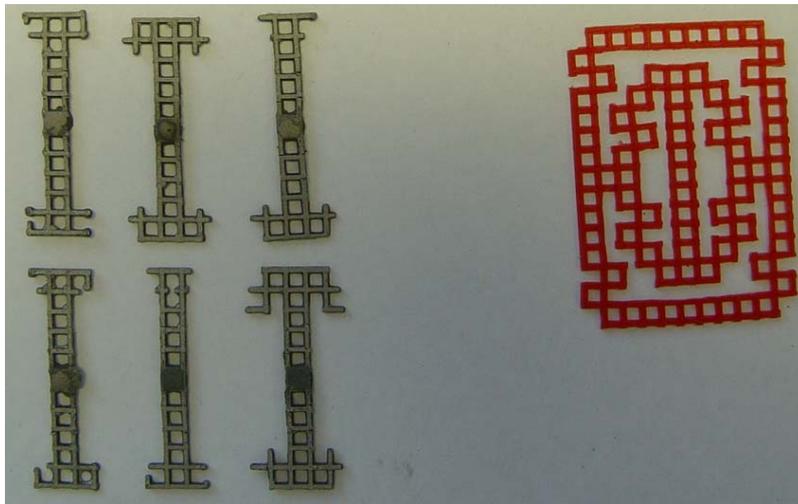


Abb. 9.14: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1340 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	13	16,46
2	15	18,99
3	12	15,19
4	12	15,19
5	9	11,39
6	15	18,99
<b>Mittelwert</b>	12,67	<b>16,03</b>
<b>Median</b>	12,5	<b>15,82</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,01	<b>1,01</b>
<b>Standardabweichung</b>	2,05	<b>2,60</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	5,06	<b>8,11</b>

Tab. 9.14: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1340 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur +100 °C

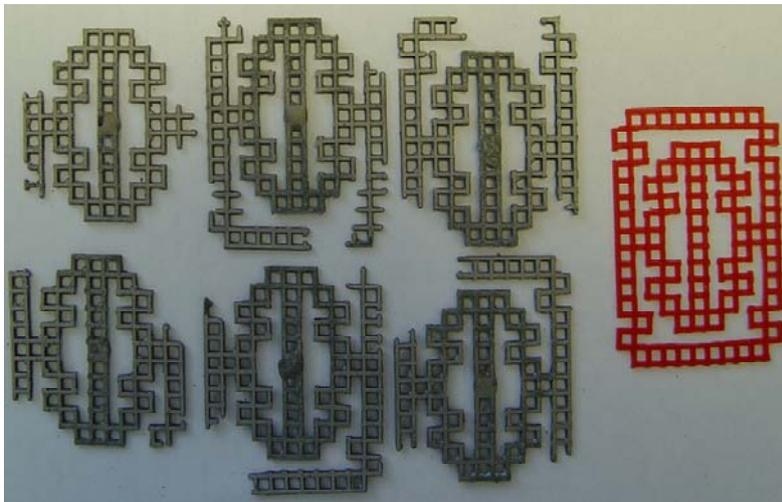


Abb. 9.15: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1540 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	55	69,62
2	54	68,35
3	51	64,56
4	38	48,10
5	46	58,23
6	54	68,35
<b>Mittelwert</b>	49,67	<b>62,87</b>
<b>Median</b>	52,5	<b>66,46</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,94	<b>0,94</b>
<b>Standardabweichung</b>	6,02	<b>7,62</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	43,46	<b>69,64</b>

Tab. 9.15: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1540 °C)

## 9.2 Ergebnisse der Ausfließtests der EMF – Aufbrennlegierungen

### 9.2.1 Versuchsergebnisse der Wirobond C – Serie

Variation der Vorwärmtemperatur -100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben



Abb. 9.16: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 800 °C/ Gießtemperatur 1500 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	37	46,84
2	37	46,84
3	33	41,77
4	47	59,49
5	49	62,03
6	47	47,00
<b>Mittelwert</b>	41,67	<b>50,66</b>
<b>Median</b>	42	<b>46,92</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,99	<b>1,07</b>
<b>Standardabweichung</b>	6,18	<b>7,40</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	45,86	<b>65,77</b>

Tab. 9.16: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 800 °C/ Gießtemperatur 1500 °C)

Vorwärmtemperatur/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

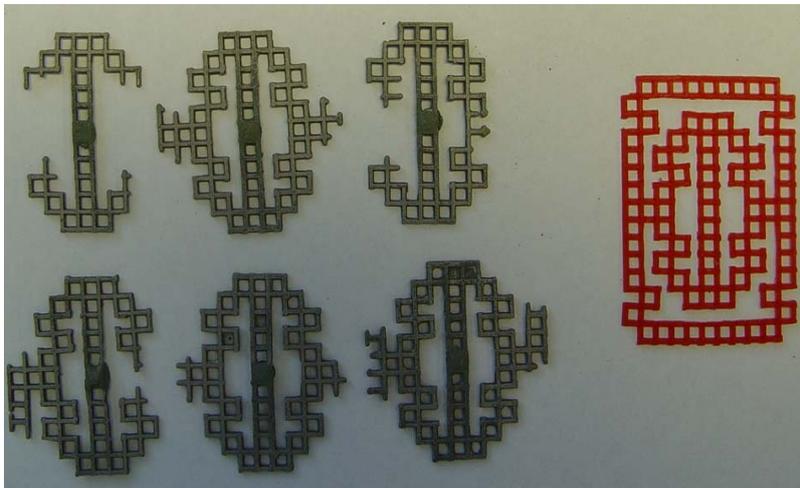


Abb. 9.17: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1500 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	35	44,30
2	25	31,65
3	36	45,57
4	37	46,84
5	33	41,77
6	20	25,32
<b>Mittelwert</b>	31	<b>39,24</b>
<b>Median</b>	34	<b>43,04</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,91	<b>0,91</b>
<b>Standardabweichung</b>	6,3	<b>7,97</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	47,6	<b>76,27</b>

Tab. 9.17: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1500 °C)

Variation der Vorwärmtemperatur +100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

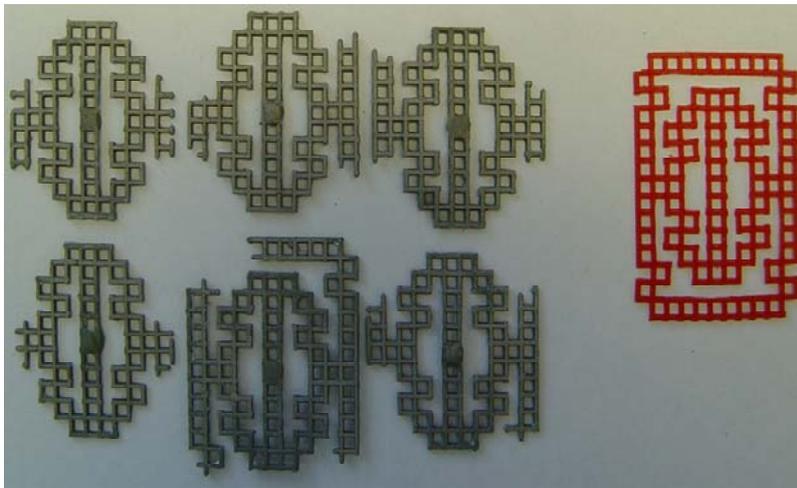


Abb. 9.18: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1500 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	38	48,10
2	43	54,43
3	44	55,70
4	43	54,43
5	35	44,30
6	61	77,22
<b>Mittelwert</b>	44	<b>55,70</b>
<b>Median</b>	43	<b>54,43</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,02	<b>1,02</b>
<b>Standardabweichung</b>	8,25	<b>10,44</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	81,6	<b>130,74</b>

Tab. 9.18: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1500 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur -100 °C

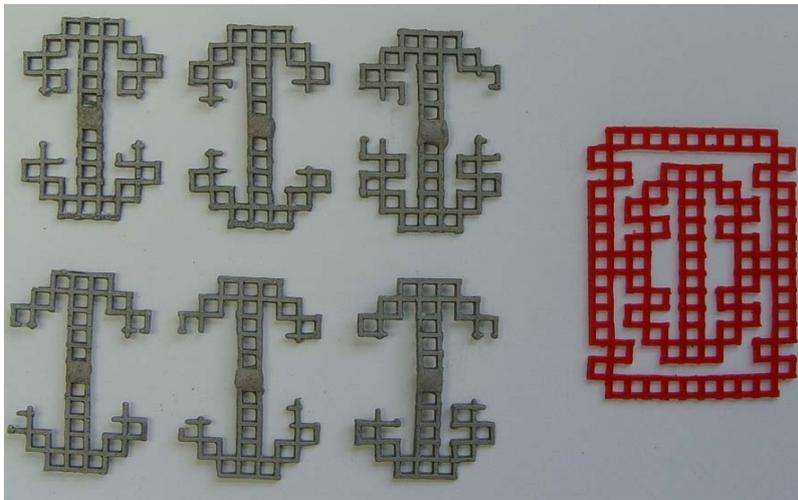


Abb. 9.19: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1400 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	20	25,32
2	23	29,11
3	21	26,58
4	24	30,38
5	25	31,65
6	23	29,11
<b>Mittelwert</b>	22,67	<b>28,69</b>
<b>Median</b>	23	<b>29,11</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,98	<b>0,98</b>
<b>Standardabweichung</b>	1,7	<b>2,15</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	3,46	<b>5,55</b>

Tab. 9.19: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1400 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur +50 °C

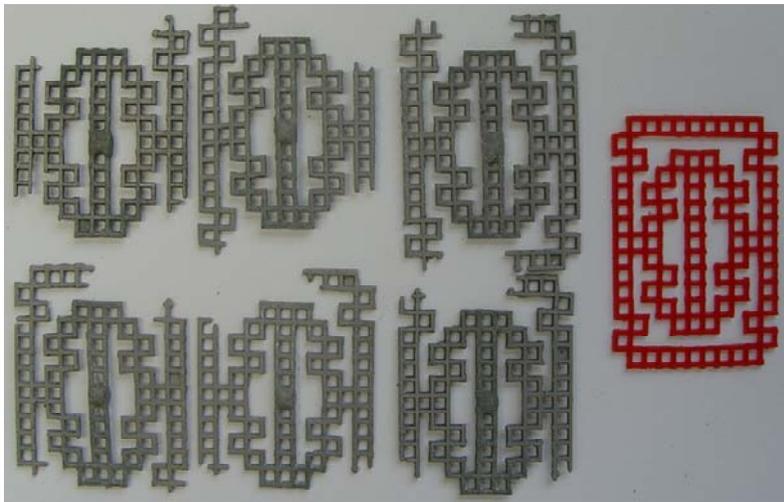


Abb. 9.20: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	51	64,56
2	54	68,35
3	58	73,42
4	65	82,28
5	56	70,89
6	55	69,62
<b>Mittelwert</b>	56,5	<b>71,52</b>
<b>Median</b>	55,5	<b>70,25</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,01	<b>1,01</b>
<b>Standardabweichung</b>	4,35	<b>5,51</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	22,7	<b>36,37</b>

Tab. 9.20: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

## 9.2.2 Versuchsergebnisse der Wirobond LFC – Serie

Variation der Vorwärmtemperatur -100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

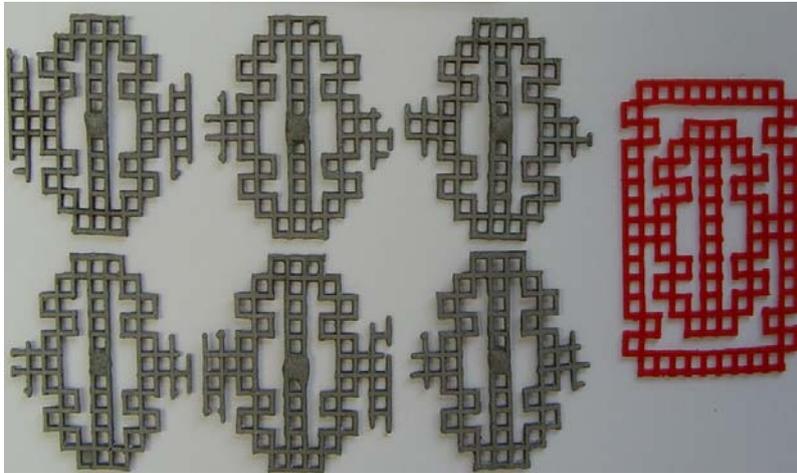


Abb. 9.21: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 800 °C/ Gießtemperatur 1480 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	39	49,37
2	35	44,30
3	35	44,30
4	42	53,16
5	36	45,57
6	35	44,30
<b>Mittelwert</b>	37	<b>46,83</b>
<b>Median</b>	35,5	<b>44,94</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,04	<b>1,04</b>
<b>Standardabweichung</b>	2,65	<b>3,15</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	8,4	<b>11,94</b>

Tab. 9.21: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 800 °C/ Gießtemperatur 1480 °C)

### Vorwärmtemperatur/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

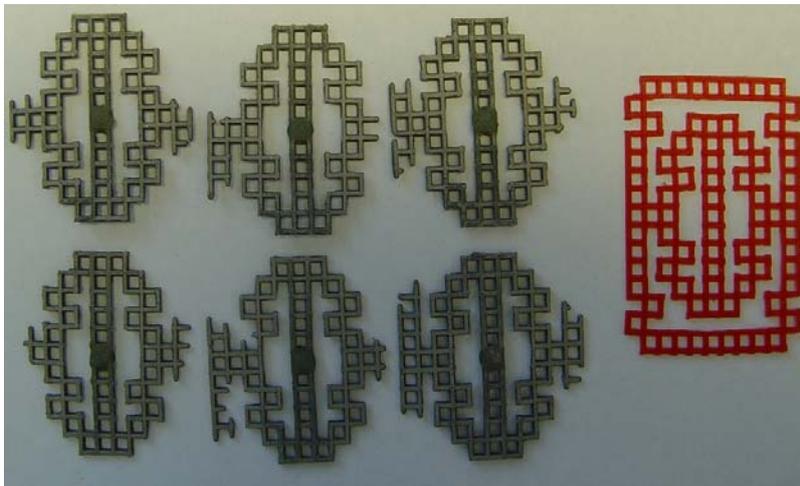


Abb. 9.22: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1480 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	36	45,57
2	37	46,84
3	36	45,57
4	42	53,16
5	36	45,57
6	35	44,30
<b>Mittelwert</b>	37	<b>46,84</b>
<b>Median</b>	36	<b>45,57</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,02	<b>1,02</b>
<b>Standardabweichung</b>	2,31	<b>2,92</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	6,4	<b>10,25</b>

Tab. 9.22: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1480 °C)

Variation der Vorwärmtemperatur +100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

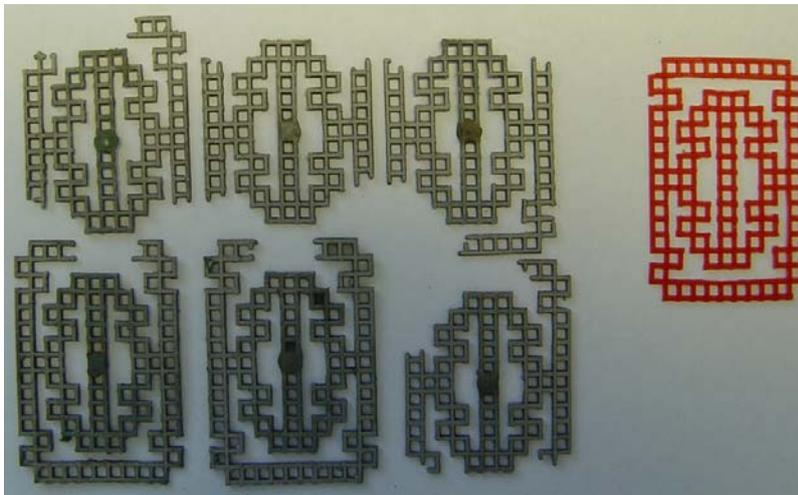


Abb. 9.23: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1480 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	54	68,35
2	73	92,41
3	73	92,41
4	54	68,35
5	53	67,09
6	48	60,76
<b>Mittelwert</b>	59,17	<b>74,90</b>
<b>Median</b>	54	<b>68,35</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,09	<b>1,09</b>
<b>Standardabweichung</b>	9,99	<b>12,65</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	119,76	<b>191,90</b>

Tab. 9.23: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1480 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur -100 °C

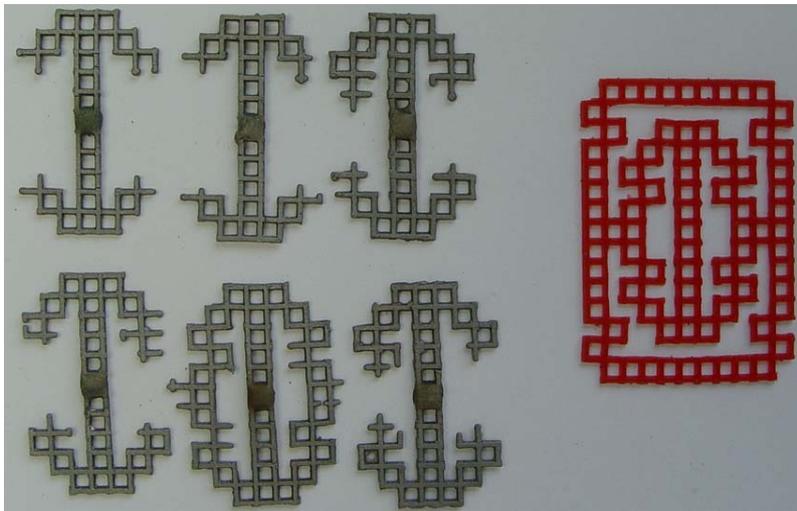


Abb. 9.24: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1380 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	22	27,85
2	19	24,05
3	19	24,05
4	23	29,11
5	31	39,24
6	21	26,58
<b>Mittelwert</b>	22,5	<b>28,48</b>
<b>Median</b>	21,5	<b>27,22</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,04	<b>1,04</b>
<b>Standardabweichung</b>	4,07	<b>5,15</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	19,9	<b>31,88</b>

Tab. 9.24: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1380 °C)

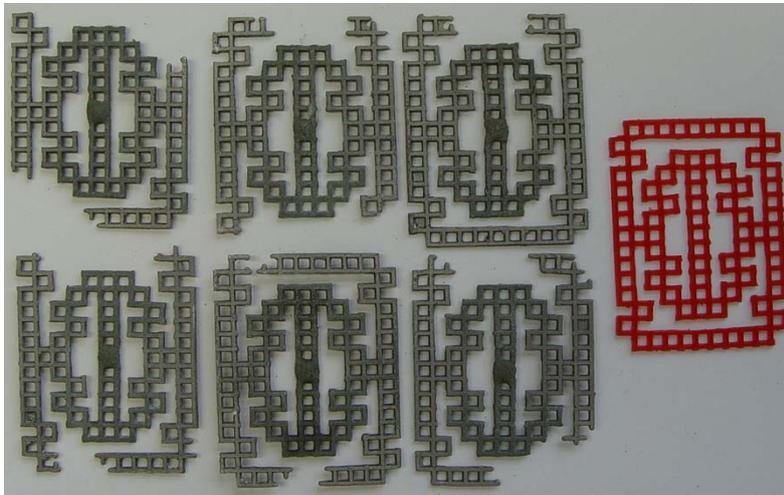
Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur +70 °C

Abb. 9.25: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	72	91,14
2	59	74,68
3	61	77,22
4	58	73,42
5	72	91,14
6	64	81,01
<b>Mittelwert</b>	64,33	<b>81,43</b>
<b>Median</b>	62,5	<b>79,11</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,02	<b>1,02</b>
<b>Standardabweichung</b>	5,73	<b>7,26</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	39,46	<b>63,23</b>

Tab. 9.25: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

### 9.2.3 Versuchsergebnisse der Wiron 99 – Serie

Variation der Vorwärmtemperatur -100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

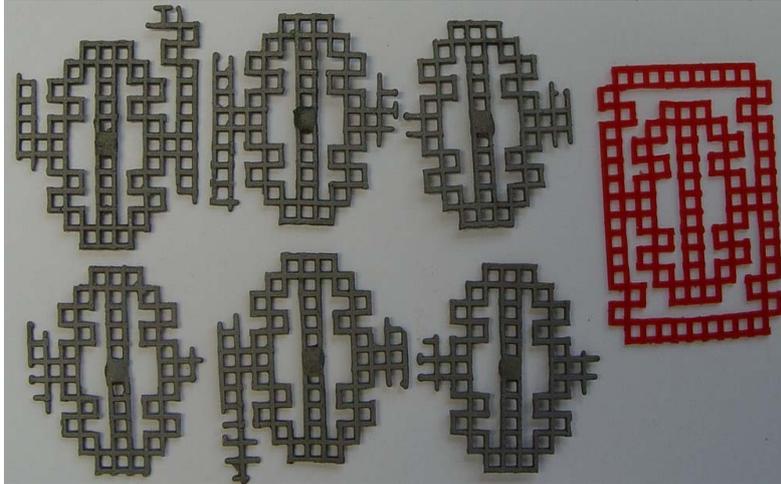


Abb. 9.26: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 800 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	41	51,90
2	48	60,76
3	35	44,30
4	42	53,16
5	36	45,57
6	35	47,00
<b>Mittelwert</b>	39,5	<b>50,45</b>
<b>Median</b>	38,5	<b>49,45</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1,02	<b>1,02</b>
<b>Standardabweichung</b>	4,72	<b>5,62</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	26,7	<b>37,85</b>

Tab. 9.26: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 800 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

### Vorwärmtemperatur/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

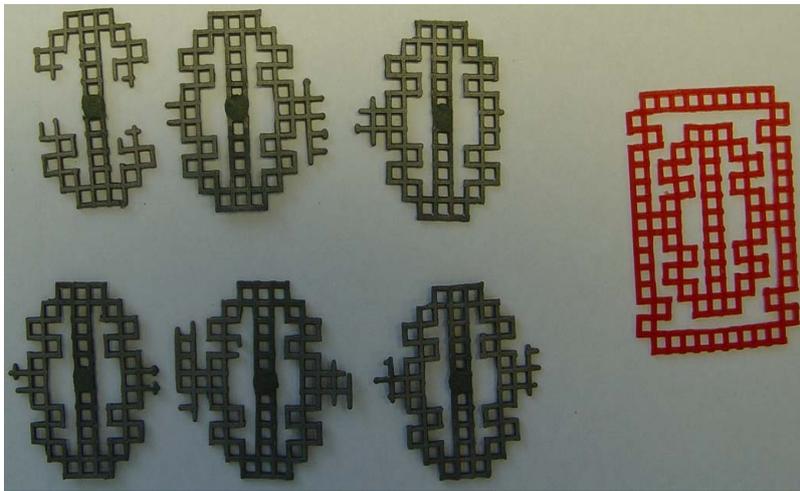


Abb. 9.27: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	38	48,10
2	34	43,04
3	34	43,04
4	35	44,30
5	33	41,77
6	24	30,38
<b>Mittelwert</b>	33	<b>41,77</b>
<b>Median</b>	34	<b>43,04</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,97	<b>0,97</b>
<b>Standardabweichung</b>	4,32	<b>5,47</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	22,4	<b>35,89</b>

Tab. 9.27: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Variation der Vorwärmtemperatur +100 °C/ Gießtemperatur nach Herstellerangaben

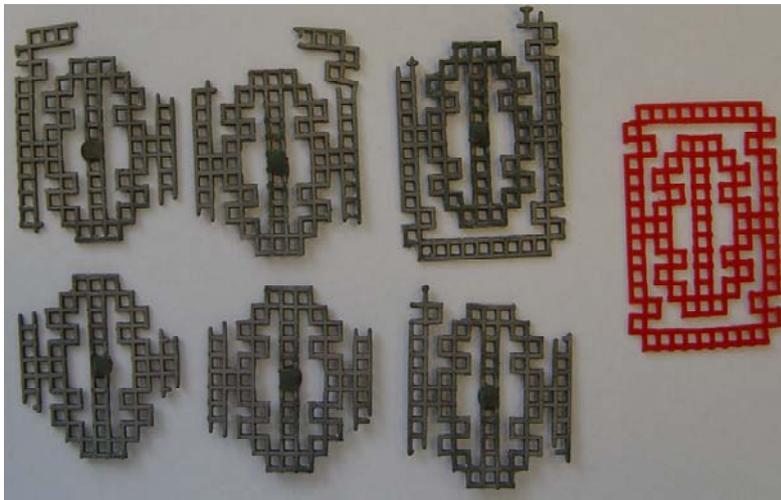


Abb. 9.28: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	67	84,81
2	53	67,09
3	44	55,70
4	40	50,63
5	48	60,76
6	54	68,35
<b>Mittelwert</b>	51	<b>64,56</b>
<b>Median</b>	50,5	<b>63,92</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1	<b>1,01</b>
<b>Standardabweichung</b>	8,64	<b>10,94</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	89,6	<b>143,56</b>

Tab. 9.28: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 1000 °C/ Gießtemperatur 1450 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur -100 °C

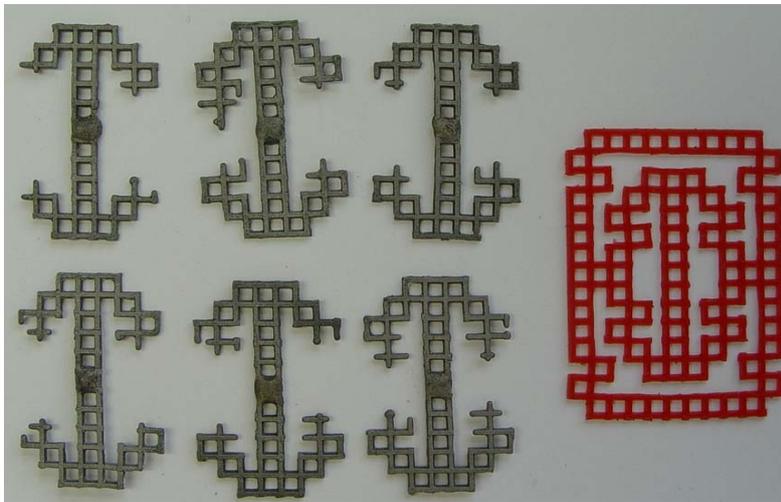


Abb. 9.29: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1350 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	23	29,11
2	22	27,85
3	22	27,85
4	21	26,58
5	21	26,58
6	20	25,32
<b>Mittelwert</b>	21,5	<b>27,22</b>
<b>Median</b>	21,5	<b>27,22</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	1	<b>1,00</b>
<b>Standardabweichung</b>	0,96	<b>1,21</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	1,1	<b>1,76</b>

Tab. 9.29: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1350 °C)

Vorwärmtemperatur nach Herstellerangaben/ Variation der Gießtemperatur +100 °C

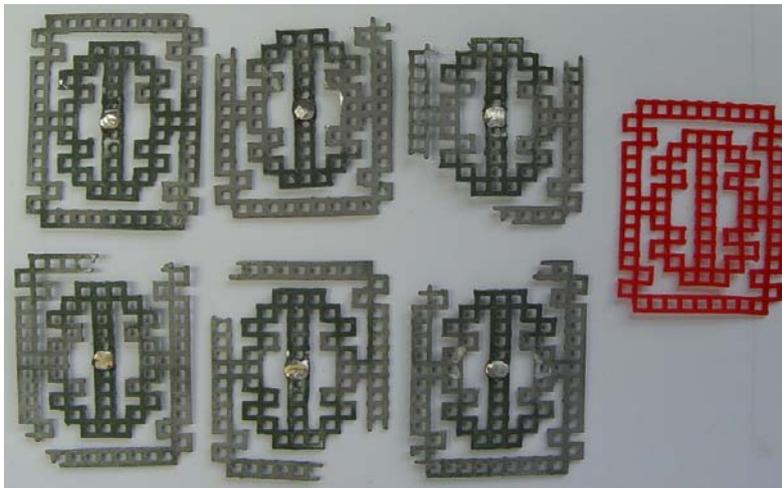


Abb. 9.30: Prüfgitter (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

Prüfkörper	Formfüllung (Anzahl der ausgezählten Kästchen)	Formfüllung des Prüfkörpers in %
1	79	100,00
2	69	87,34
3	67	84,81
4	55	69,62
5	70	88,61
6	66	83,54
<b>Mittelwert</b>	67,67	<b>85,66</b>
<b>Median</b>	68	<b>86,08</b>
<b>Mittelwert/Median</b>	0,99	<b>0,99</b>
<b>Standardabweichung</b>	7,06	<b>8,94</b>
<b>Variationskoeffizient</b>	59,86	<b>95,92</b>

Tab. 9.30: Einzelergebnisse (Vorwärmtemperatur 900 °C/ Gießtemperatur 1550 °C)

## Danksagung

Ich möchte mich ausdrücklich bei Herrn PD Dr. Roland Strietzel bedanken. Er gab mir die Möglichkeit durch Überlassung des Themas eine zahntechnisch wissenschaftliche Thematik zu bearbeiten. Mit seiner fachlich kompetenten und freundlichen Art stand er mir jederzeit hilfreich zur Seite.

Besonders bedanken möchte ich mich bei der Firma BEGO, die durch die Bereitstellung sämtlicher versuchsrelevanter Materialien eine Realisierung der Gießversuche ermöglichte. Gedankt sei dabei ganz herzlich Frau Monika Poppinga, die mich während der Gießversuche unterstützte.

Außerdem sei auch meiner Familie und meinen Freunden gedankt, allen voran meinen Eltern für ihre langjährige Unterstützung.

**Lebenslauf**

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.