

## 4 Eigene Untersuchungen

### 4.1 Material und Methode

#### 4.1.1 verwendete Materialien

##### 4.1.1.1 Legierung

Als Legierung wurde Wironit<sup>®</sup> extrahart (Fa. BEGO) verwendet (Charge 61043). Dies ist eine nickelfreie Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierung, welche für die Modellguss-Technik entwickelt wurde.

Die Inhaltsstoffe setzen sich wie folgt zusammen (in Masse-%):

- 63% Kobalt
- 30% Chrom
- 5% Molybdän
- 1,1% Silizium
- 0,5% Mangan
- 0,4% Kohlenstoff

Mit einer Vickershärte (HV 10) von 375, einer Zugfestigkeit (R<sub>m</sub>) von 910 [MPa] und einer Dehngrenze (R<sub>p</sub> 0,2) von 625 [MPa] eignet sich diese Legierung gut für Modellguss-Arbeiten.

Das Schmelzintervall liegt bei 1305-1260 °C und die Gießtemperatur bei 1420 °C. Pro Muffel wurden zwei Gusszylinder (ca. 12 g) verwendet.

#### **4.1.1.2 Einbettmasse**

Die verwendete Legierung bedingt aufgrund der benötigten hohen Gießtemperatur eine phosphatgebundene Einbettmasse. Es wurde hierfür Wirovest® (BEGO) als Pulver und ein Gemisch aus BegoSol® 90 %ig (BEGO) und destilliertem Wasser als Flüssigkeit verwendet.

Für 400 g Pulver benötigt man 60 ml Flüssigkeit, um die Masse optimal anzumischen. Wobei sich die Flüssigkeit aus 18 ml BegoSol® und 42 ml destilliertem Wasser zusammensetzt.

Nach dem 10-20 sekündigen manuellen Anmischen erfolgt ein maschinelles Anrühren unter Vakuum für 60 Sekunden.

#### **4.1.1.3 Wachs**

Als Grundlage für die Prüfkörper wurden Wachsretentionsgitter (BEGO) mit quadratischen Retentionen und einer jeweiligen Kantenlänge von 2,51 mm verwendet.

## 4.1.2 verwendete Geräte

### 4.1.2.1 Gussmaschinen

Für den zweiten Teil, der Anwendung des Prüfkörpers, wurden die folgenden Gussmaschinen verwendet und verglichen:

- Fundor T (BEGO)



Abb. 1: Fundor T

Es handelt sich hierbei um eine Tisch-Gussschleuder für das Flammenschmelzen. Das Gerät gilt als eine robuste und kostengünstige Allround-Schleuder die für nahezu jede Legierung verwendet werden kann (außer Titan). Die Legierung wird mit einem Multiplex-Microflamme Schmelzgerät, welches eine Bündelung der Flamme und damit eine schnelle und schonende Schmelzung ermöglicht, verflüssigt. Als Gas wird eine Propan/Sauerstoff-Mischung verwendet [4].

- Fornax G (BEGO)



Abb. 2: Fornax G

Dieses Gerät stellt eine Hochfrequenz-Gussschleuder dar. Sie ist eine sehr leistungsstarke und universelle Gussmaschine, sowohl für Edelmetall, als auch für Nichteidmetall geeignet. Durch den Hochfrequenz Generator soll ein schonendes Schmelzen gewährleistet werden [6].

- Fornax T (BEGO)



Abb. 3: Fornax T

Eine kompakte Gusschleuder ergänzt durch eine Induktionsheizung mit einem Halbleiter-Generator für die Schmelzung. Anwendbar für alle gebräuchlichen, zahnmedizinischen Legierungen (außer Titan) [5].

- Nautilus MC Plus (BEGO)



Abb. 4: Nautilus MC Plus

Ein Vertreter der Vakuum-Druckguss-Maschinen mit einer hochfrequenten Induktions-Schmelzeinrichtung. Mit Hilfe der Möglichkeit die benötigte Energiemenge auszurechnen, bzw. den Gießzeitpunkt einzugeben, soll eine Optimierung desselben zustande kommen. Ein Gussprotokoll kann unmittelbar nach dem Guss ausgedruckt werden, um eine Auswertung und Verfeinerung der Parameter zu erreichen [8, 49].

- Nautilus T (BEGO)



Abb. 5: Nautilus T

Ebenfalls eine Vakuum-Druckguss-Maschine kombiniert mit einer Hochfrequenz-Schmelzeinrichtung. Dieser Typ arbeitet auch mit einer Gießzeitpunkterkennung. Dieses Gerät ist die Weiterentwicklung der Nautilus MC Plus [9].

- Nautilus CC (BEGO)



Abb. 6: Nautilus CC

Dieses Gerät stellt die momentan aktuellste und optimiertest Version einer Vakuum-Druckgussmaschine von BEGO dar. Anwendbar für nahezu alle dentalen Legierungen (außer Titan) bietet auch sie die Option der Eingabe einer Legierungskennung, um den Gießzeitpunkt ideal zu erfassen. Zudem enthält sie ein vollautomatisches Gießprogramm, basierend auf den Legierungsangaben des Herstellers. Das macht dieses Gerät einfach in Handhabung und minimiert mögliche Fehler [7].

- Motorcast compact (DEGUSSA)

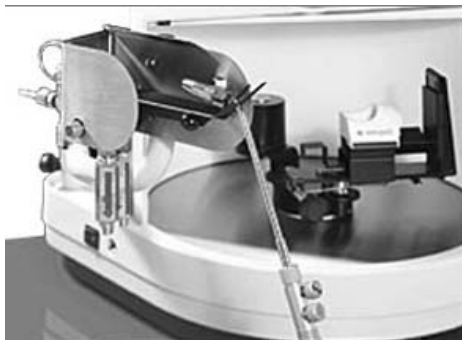


Abb. 7: Motorcast compact

Die Motorcast compact ist ein Gerät bei der die Schmelze via Schleuderguss in die Muffel gelangt. Die Legierung selbst wird durch Flammenschmelzung für den Guss vorbereitet.

Aufgrund der kleinen Ausmaße und der universellen Einsatzfähigkeit ist sie eine häufig verwendete Allround-Maschine.

- Degumat (DEGUDENT)



Abb. 8: Degumat

Dieses Gerät verwendet ebenfalls den Schleuderguss.

Die Besonderheit ist jedoch, dass hier mit Hilfe der Lichtbogen-Technik die Legierung geschmolzen wird.

- Neocast (GIRRBACH)



Abb. 9: Neocast

Es handelt sich hierbei um ein Schleudergussgerät bei dem die Legierung durch ein Hochfrequenz-Verfahren geschmolzen wird. Durch eine digitale Temperaturüberwachung soll ein Überhitzen verhindert werden. Diese Maschine arbeitet unter Vakuum in Verbindung mit Argongas (Typ V). Hierdurch sollen störende, den Guss verfälschende Gase, die sich beim Gießvorgang in der Einbettmasse bilden sofort abgesaugt werden. Durch die Argongasspülung erhält das Metall eine oxidfreie, helle Oberfläche [21].

- Induktherm HFS 3 Standard (LINN)



Abb. 10: HFS 3 Standard

Auch diese Maschine arbeitet mit einer Schleuder zum Gießen der Schmelze. Hier wird ebenfalls durch ein hochfrequentes Induktionsverfahren geschmolzen. Durch das Vorhandensein eines Vakuums werden auftretende, störende Gase entfernt.

#### **4.1.2.2 Sonstige Geräte und Zusatzmaterialien**

- Vakuumgerät: Wassermann WaMix 6 bar
- Vorwärmofen: Miditherm MP 200 (Temperatur: 1000 °C)
- Abstrahlgerät: Duostar F1
- Muffel (Kunststoff)
- Anstiftwachs mit 3 mm Durchmesser

## 4.2 Entwicklung des Prüfkörpers

### 4.2.1 Übersicht und Planung

Die grundlegende Planung folgte den bereits oben genannten Kriterien. Als Ausgangsmaterial wurden nur Wachsretentionsgitter verwendet, wie sie bei Modellgussarbeiten als Kunststoffretention dienen. Die fürs Einbetten benötigten Kunststoffmuffeln hatten einen Durchmesser von 5 cm.

Bereits nach kurzer Zeit wurde klar, dass man die Anforderungen um einige Kriterien erweitern musste. So sollte eine möglichst einfache Methode der Auswertung vollziehbar sein, eine die man schnell und doch eindeutig durchführen kann. Ansonsten wäre der Prüfkörper nicht sonderlich praktikabel.

Außerdem sollte die Anwendung, also das Anstiften und Einbetten, ebenso einfach und rasch erfolgen können. Denn durch komplizierte Anstiftetechniken würde man unnötig Fehlerquellen und Verfälschungen provozieren.

Es sollten ca. 20 Prüfkörper entworfen und auf ihre Tauglichkeit getestet werden, jeweils in dreifacher Ausführung. Die Körper konnten in jeglicher Hinsicht variieren, sowohl in Geometrie, Größe der Quadrate, Lage des Prüfkörpers in der Muffel und der Anstiftung.

Alle drei angefertigten Wachsmodellationen eines Entwurfes wurden dann nahezu gleichzeitig mit demselben Flüssigkeitsgemisch eingebettet, um eventuellen Variationen bedingt durch tageszeitabhängige Temperaturschwankungen oder minimale Unterschiede in der Einbettflüssigkeit vorzubeugen. Das Einbettpulver wurde grammgenau abgewogen und dann mit der entsprechend abgemessenen Menge an Liquid vermischt.

Nach der Einbettung wurden die gehärteten Muffeln in feuchte Tücher gewickelt, um ein Austrocknen auf dem Weg ins Labor zu verhindern.

Die Entwurfsgruppen wurden jeweils gemeinsam vorgewärmt und hintereinander gegossen, um auch hier ofenbedingte Temperaturschwankungen zu vermeiden.

Das Gießen der Muffeln erfolgte im Labor mit der Neocast-Gussmaschine von der Firma Girrbach.

Nach dem Ausbetten und Abstrahlen erfolgte die Bewertung der Prüfkörper (siehe Tab. 1 unter 4.2.3.).



#### **4.2.2 Entwürfe**

Es wird jeder Entwurf anhand einer schematischen Darstellung vorgestellt. Darunter ist die bereits angestiftete Wachsmodellation zu sehen, während sich in der dritten Zeile das der Wachsmodellation entsprechende Gussresultat präsentiert.

Da jeder Prüfkörper in dreifacher Ausführung hergestellt und gegossen wurde und sich die Gussergebnisse einer Versuchreihe sehr ähnelten, wird hier exemplarisch jeweils nur der repräsentativste Guss dargeboten.

Um eine dimensionale Vorstellung der Prüfkörper zu erhalten sind an den Seiten der schematischen Darstellung die Maße jeweils in Millimeter angegeben.

#### 4.2.2.1 Entwürfe 1 – 4

Die ersten vier Entwürfe stellen ein relativ simples Design mit wenigen Variationen dar. Sie dienen einer ersten Orientierung und Abschätzung.

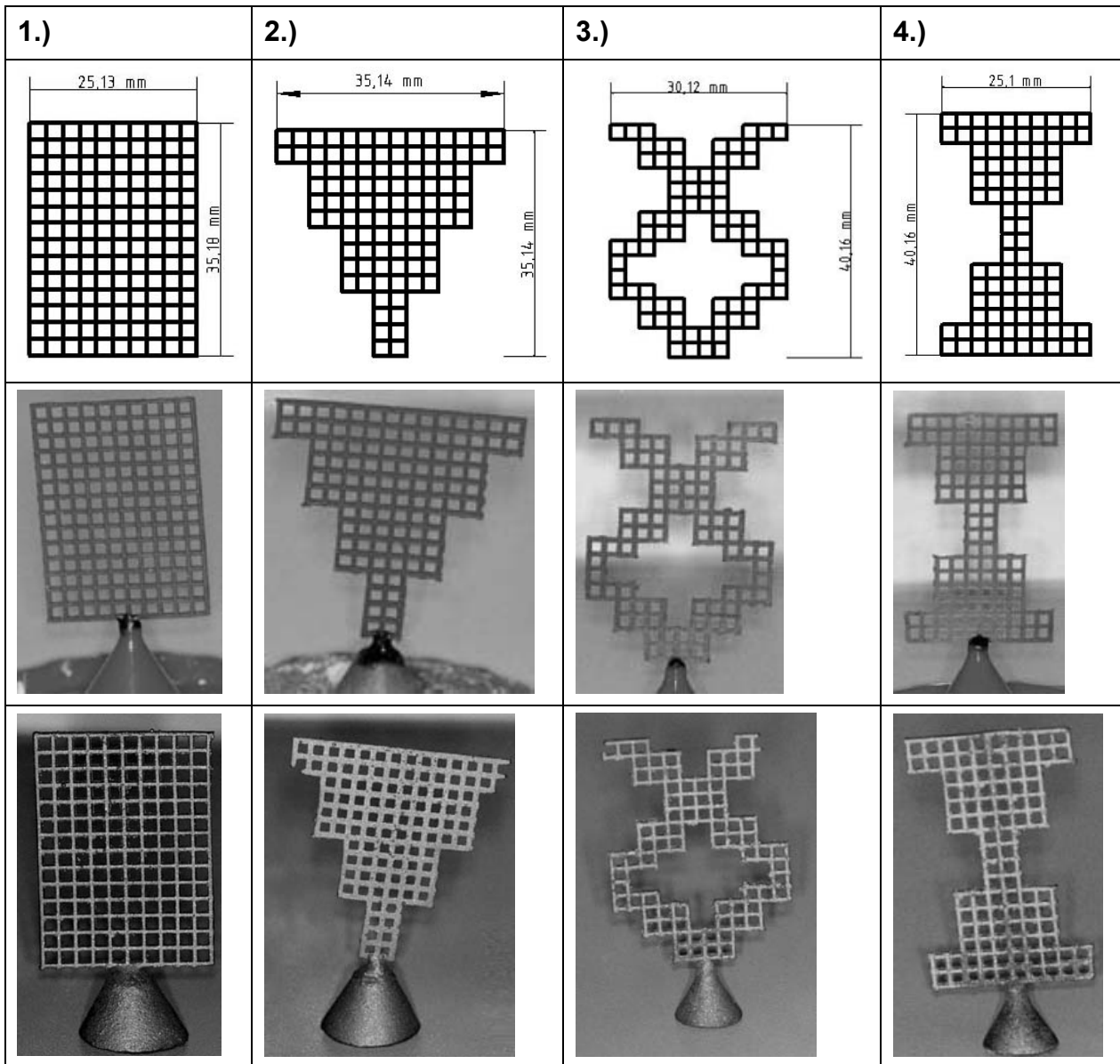


Abb. 11: Prüfkörper 1-4

#### 4.2.2.2 Entwürfe 5 – 7

Prüfkörper fünf bis sieben zeichnen sich durch deutliche Variation der Größe, Anordnung und Form der Retentionsquadrate aus. Nummer sieben weist zudem noch eine links/rechts Asymmetrie auf. Bei fünf und sechs fließt das Metall erst durch wenige und dünne Bahnen, welche den Fluss desselben aufhalten sollten, um dann in einem Bereich zu gelangen, in dem viel Material benötigt wird.

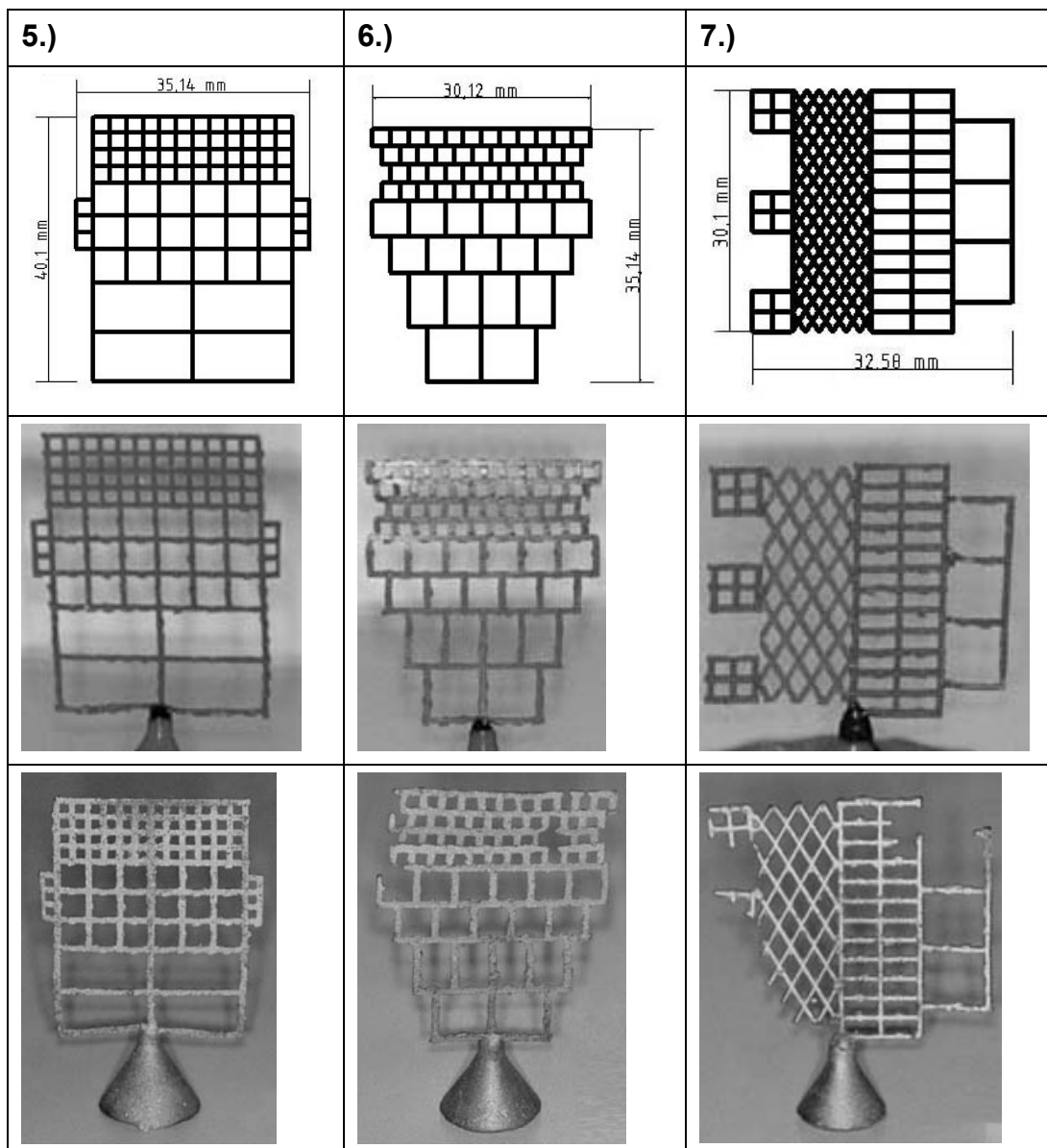


Abb. 12: Prüfkörper 5-7

#### 4.2.2.3 Entwürfe 8 – 11

Die Prüfkörper acht bis elf präsentieren die komplexesten Variationen. Die unterschiedlich verengten Ausflusswege sollen für das Metall Hindernisse darstellen. Bei Nummer neun muss das Material mehrmals seine Flussrichtung ändern und das bei einer gleichzeitig konstant in eine Richtung weisenden Zentrifugalkraft, dasselbe gilt für Nummer elf. Hier muss die Legierung einen ungünstigen Weg senkrecht zur Gussrichtung einschlagen.

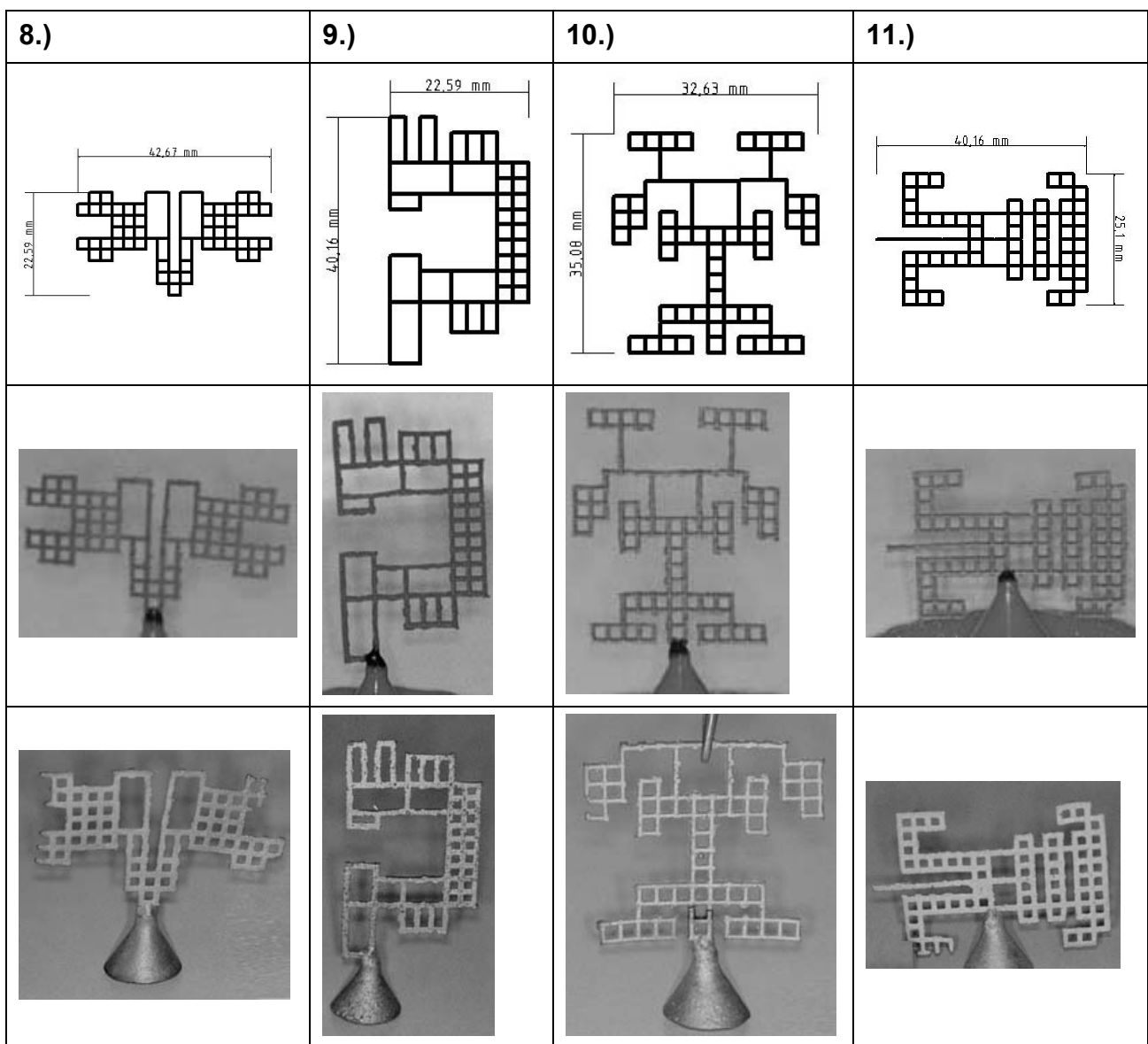


Abb. 13: Prüfkörper 8-11

#### 4.2.2.4 Entwürfe 12 – 14

Wie bei den vorherigen vier Prüfkörpern zu sehen, war durch die vermehrten Variationen von Zuflusswegen und Quadratgröße allein, kein adäquater Prüfkörper zu finden, da diese doch noch immer annähernd zu 100 Prozent ausflossen. Zudem stellte die Auswertung ein großes Problem dar. Also bauten die nächsten drei Entwürfe auf die ersten vier auf und versuchten diese zu optimieren. Beziehen sich Nummer zwölf und dreizehn auf Nummer vier und zwei, so stellt die vierzehn einen horizontal in der Muffel platzierten Prüfkörper da.

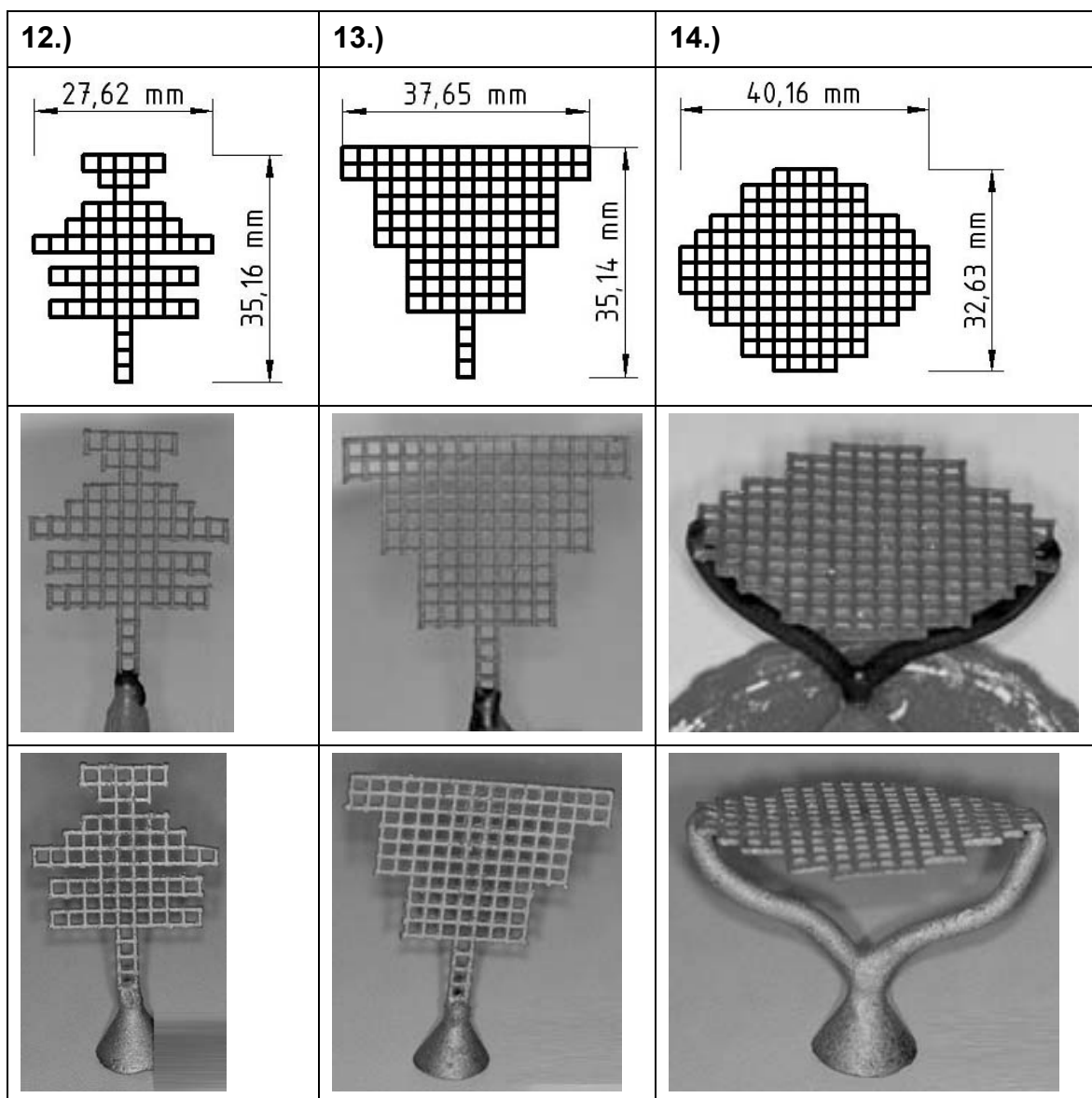


Abb. 14: Prüfkörper 12-14

#### 4.2.2.5 Entwürfe 15 – 17

Bei den Prüfkörpern fünfzehn und sechzehn handelt es sich um Meyer-Ronden und dem damit verbundenen MBS-Test. Die Versuchsreihe fünfzehn und sechzehn sind identisch. Das MBS-System wurde also zweimal in separaten Prüfserien getestet, um diesen etablierten Test genau zu überprüfen. Es ist eindeutig zu sehen, dass die Meyer-Ronden, einzeln verwendet, als vergleichende Prüfkörper nicht mehr ausreichend, da alle sechs (zwei x drei Prüfkörper) zu 100 Prozent ausflossen. Nummer siebzehn ist eine Verfeinerung der Nummer vierzehn.

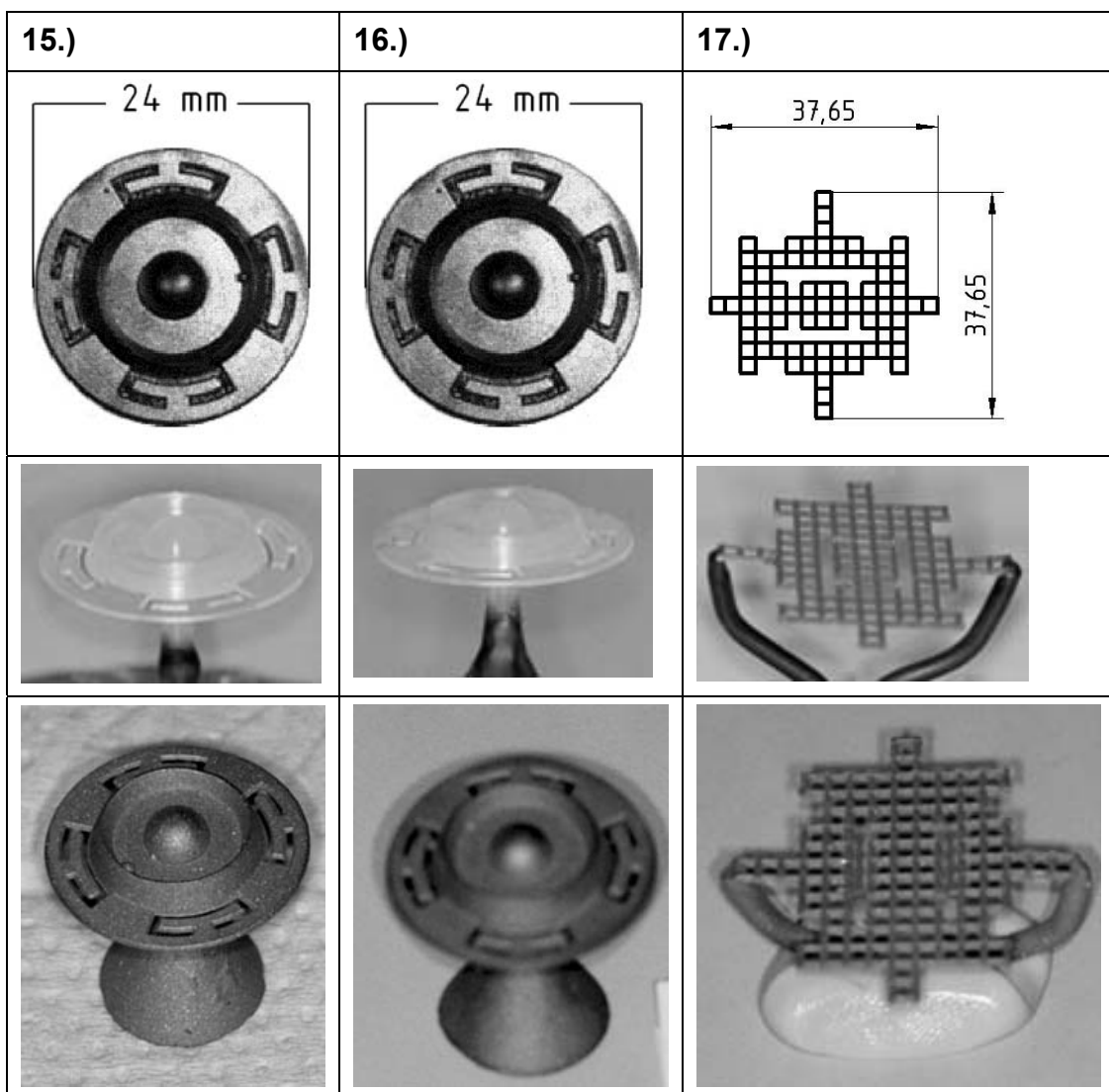


Abb. 15: Prüfkörper 15-17

#### 4.2.2.6 Entwürfe 18 – 20

Diese Entwürfe bauen auf dem Prinzip der MBS-Test-Prüfkörper auf. Sie bestehen aus einem äußeren und einem inneren Anteil. Das Metall muss erst den kompletten Innenteil überwinden, dann einen äußerst dünnen Verbindungspart durchqueren, um dann den materialfordernden Außenbereich zu erreichen.

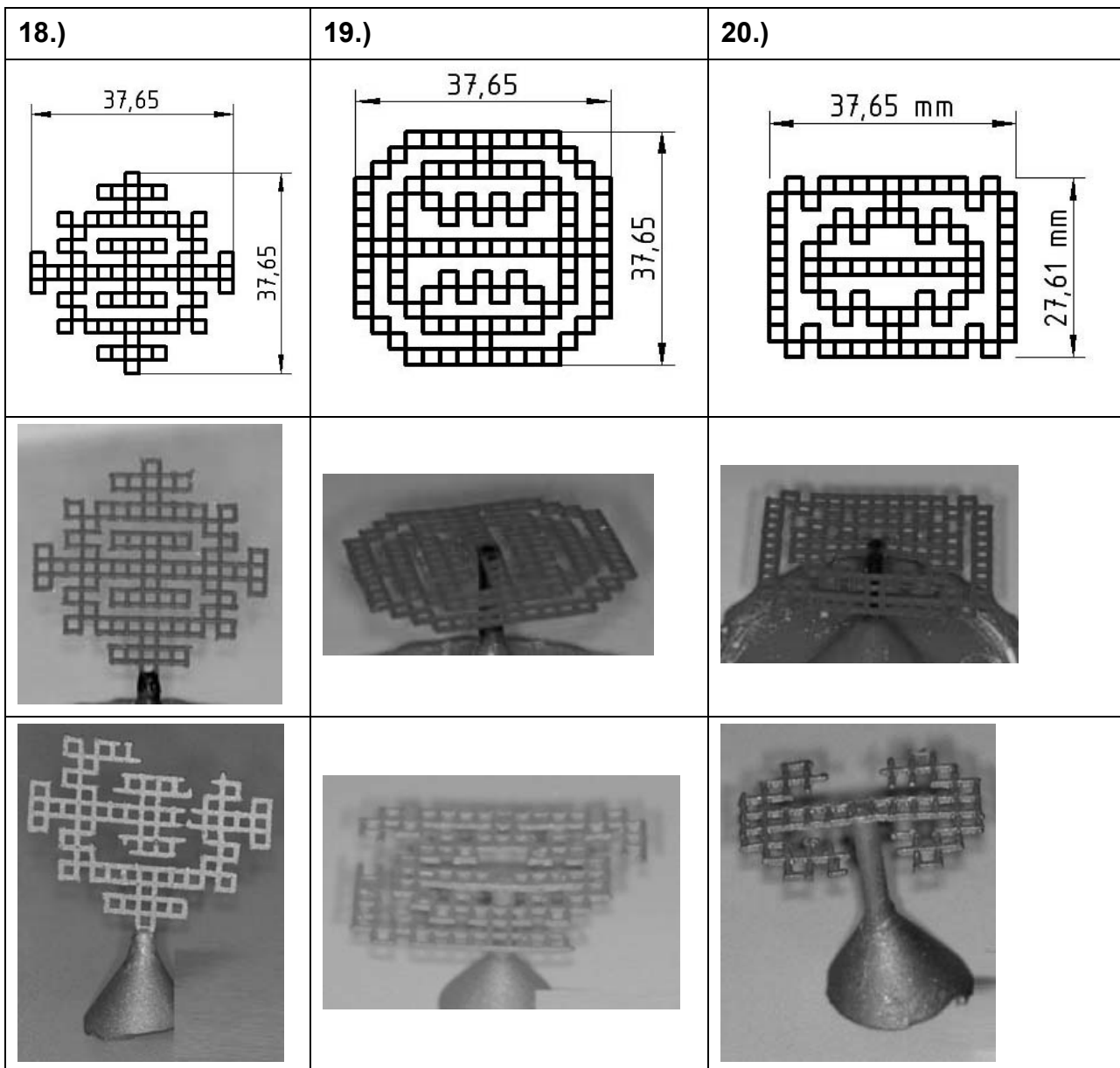


Abb. 16: Prüfkörper 18-20

### 4.2.3. Auswertung und Diskussion der Prüfkörper

#### 4.2.3.1. Bewertungskriterien

Nachdem Ausbetten und Abstrahlen wurden alle Prüfkörper nach fünf Kriterien untersucht und beurteilt. Diese Kriterien, die als Bewertungsgrundlage dienen, stellen die wichtigsten Anforderungen an ein Prüfsystem dar.

In jeder Kategorie gibt es maximal fünf und minimal null Punkte.

Die Punkte entsprechen folgenden Aussagen:

|   |   |              |
|---|---|--------------|
| 0 | - | schlecht     |
| 1 | - | mangelhaft   |
| 2 | - | ungenügend   |
| 3 | - | befriedigend |
| 4 | - | gut          |
| 5 | - | sehr gut     |

Tab. 1: Bewertungsmaßstab

Beim Ermitteln der Kategorien wurde deutlich, dass einige essentieller für ein Prüfsystem sind als andere. Um diese Feststellung in die Auswertung mit einfließen zu lassen, wird jeder Kategorie ein Faktor beigeordnet und mit dem zugewiesenen Wert multipliziert. Hierdurch ist eine unterschiedliche Gewichtung möglich.

Für jeden Prüfkörper werden die fünf sich ergebenden Produkte addiert und der Mittelwert errechnet. Dieser wird als Prüfkörper-Wertungs-Index (PWI) definiert. Je höher der PWI, desto praktikabler ist der Prüfkörper.

Die Formel zur Errechnung des PWIs lautet:

$$\text{PWI} = ((\text{Ausfließverhalten} * 1,8) + (\text{Auswertbarkeit} * 1,2) + (\text{Reproduzierbarkeit} * 1,5) + \text{Anwendung} * 0,8) + (\text{Herstellung} * 0,5) / 5$$

- Ausfließverhalten (Faktor: 1,8)

Eines der wichtigsten Kriterien. Repräsentiert doch das Ausfließverhalten in welchem Maße der Prüfkörper ausfließt. Wobei zu beachten ist, dass man diesen Wert bezüglich der Aufgabenstellung interpretieren muss. Ein hundertprozentiges Ausfließen ist also ebenso wenig erwünscht wie das Ausfließen in den nur anfänglichen Anteilen des Körpers.



Angestrebt wird hier ein Wert von etwa 20 bis 90 Prozent. Dadurch bleibt genügend Bewertungsspielraum für andere Guss-Schmelz-Legierungskombinationen, sowohl nach oben, als auch nach unten.

- Auswertbarkeit (Faktor: 1,2)

Wie aufwendig oder wie simpel und schnell lässt sich der Prüfkörper auswerten? Dafür dient dieses Kriterium. Ein zwar in den anderen Kriterien gut bewerteter Körper ist dennoch unpraktikabel, wenn die Auswertung einen hohen zeitlichen und eventuell technischen Aufwand erfordert.

Je einfacher, schneller und dennoch eindeutig die Auswertung vollzogen werden kann, umso höher wurden die Prüfkörper bewertet.

- Reproduzierbarkeit (Faktor: 1,5)

Jeder Entwurf wurde in dreifacher Ausführung hergestellt, um Aussagen über dieses Kriterium machen zu können. Das quantitative Gussergebnis sollte nur in geringem Masse zwischen den einzelnen Prüfkörpern einer Entwurfsreihe schwanken. Um hierbei objektivieren zu können, wird ein Prozentsatz von Mittelwerten festgelegt, um den das Gussergebnis maximal schwanken sollte. Hiermit wird  $\bar{x} \pm 15\%$  definiert.

- Anwendung (Handling) (Faktor: 0,8)

Dieser Wert beschreibt, wie knifflig der Einsatz des Körpers ist. Lässt er sich einfach und eindeutig Anstiften, gut Einbetten und auch gut wieder Ausbetten ohne zu zerbrechen?

Umso diffiziler die Anwendung, desto mehr mögliche Fehlerquellen und Verfälschungen können auftreten.

- Herstellung (Faktor: 0,5)

Bei komplizierter Herstellung besteht auch hierbei die Gefahr Fehler einzubauen, die das Ergebnis verfälschen. Solange die Prüfkörper manuell von Hand hergestellt werden, darf man dieses Kriterium nicht vernachlässigen.

#### 4.2.3.2. tabellarische und grafische Darstellung

Um eine bessere Übersicht zu bekommen, wurden die Ergebnisse in einer Tabelle (Tab. 2) zusammengefasst. Die letzte Zeile stellt die Durchschnitte der einzelnen Spalten dar.

| Prüf-<br>körper | Ausfließ-<br>verhalten<br>(als Prüfkörper) | Auswert-<br>barkeit | Reprodu-<br>zierbarkeit | Anwendung<br>(Handling) | Herstellung   | Prüfkörper-<br>Wertungs-<br>Index<br>(PWI) |
|-----------------|--|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|--|
|                 | (Faktor: 1,8)                              | (Faktor: 1,2)       | (Faktor: 1,5)           | (Faktor: 0,8)           | (Faktor: 0,5) |  |
| 1               | 1  | 5                   | 0                       | 3                       | 5             | <b>2,54</b>                                |
| 2               | 1  | 5                   | 1                       | 3                       | 4             | <b>2,74</b>                                |
| 3               | 2  | 5                   | 1                       | 3                       | 3             | <b>3,00</b>                                |
| 4               | 1  | 5                   | 0                       | 3                       | 4             | <b>2,44</b>                                |
| 5               | 1  | 1                   | 0                       | 3                       | 1             | <b>1,18</b>                                |
| 6               | 1  | 1                   | 0                       | 3                       | 2             | <b>1,28</b>                                |
| 7               | 3  | 1                   | 2                       | 2                       | 2             | <b>2,44</b>                                |
| 8               | 2  | 2                   | 3                       | 2                       | 2             | <b>2,62</b>                                |
| 9               | 1  | 2                   | 0                       | 2                       | 2             | <b>1,36</b>                                |
| 10              | 2  | 1                   | 2                       | 1                       | 1             | <b>1,82</b>                                |
| 11              | 2  | 2                   | 3                       | 2                       | 2             | <b>2,62</b>                                |
| 12              | 1  | 5                   | 0                       | 3                       | 4             | <b>2,44</b>                                |
| 13              | 1  | 5                   | 0                       | 3                       | 4             | <b>2,44</b>                                |
| 14              | 1  | 5                   | 0                       | 2                       | 4             | <b>2,28</b>                                |
| 15              | 1  | 4                   | 0                       | 4                       | 0             | <b>1,96</b>                                |
| 16              | 1  | 4                   | 0                       | 4                       | 0             | <b>1,96</b>                                |
| 17              | 2  | 5                   | 2                       | 2                       | 3             | <b>3,14</b>                                |
| 18              | 4  | 5                   | 3                       | 2                       | 4             | <b>4,26</b>                                |
| 19              | 2  | 3                   | 1                       | 1                       | 2             | <b>2,10</b>                                |
| 20              | 4  | 5                   | 4                       | 4                       | 3             | <b>4,78</b>                                |
| Ø               | 1,7  | 3,55                | 1,1                     | 2,6                     | 2,6           |  |

Tab. 2: Bewertung der Prüfkörper

Zusammenfassend ergab sich, dass bei gerundeten Ergebnissen folgende Verteilung vorlag:

| Prüfkörperanzahl | Wertung      | Prozentualer Anteil |
|------------------|--------------|---------------------|
| 0                | Schlecht     | 0                   |
| 3                | Mangelhaft   | 15                  |
| 9                | Ungenügend   | 45                  |
| 6                | Befriedigend | 30                  |
| 1                | Gut          | 5                   |
| 1                | Sehr gut     | 5                   |

Tab. 3: Übersicht der gerundeten Ergebnisse

Wobei hier gilt, dass mit der Prüfkörperanzahl nicht die absolute Anzahl der Körper gemeint ist, sondern die Anzahl an Prüfkörperserien. Das bedeutet also, dass drei Prüfkörperentwurfsreihen (entspricht neun Prüfkörpern) als „mangelhaft“ zu werten sind.

Um die Resultate noch anschaulicher darzustellen, wurden diese in ein Kreisdiagramm überführt.

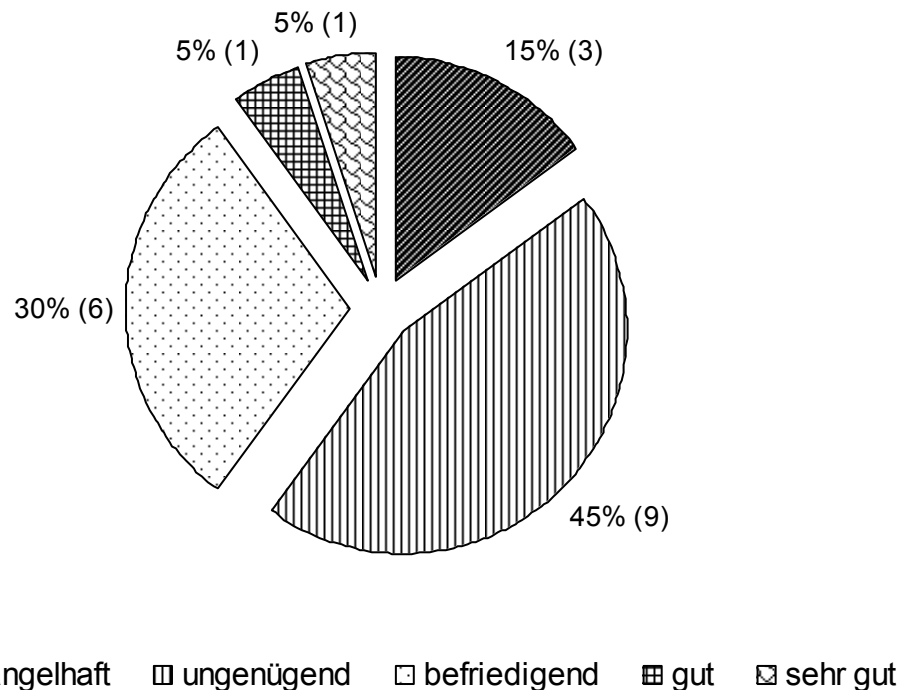


Abb. 17: Prüfkörperauswertung

Den Teilstücken des Kreises wurden noch die entsprechenden Prozentzahlen beige-fügt. Die Zahlen in den Klammern hinter den Prozenten beschreiben die Anzahl an Prüfkörperserien, die der entsprechenden Bewertung zuzuordnen sind.

Unterhalb des Diagramms befinden sich als Legende die Wertungen. Auf die Wertung „schlecht“ wurde in der Grafik verzichtet, da keine der Testreihen diese erhalten hat.

Sehr anschaulich beschreibt dieses Diagramm die deutliche Mehrheit der als unzu-reichend einzuschätzende Prüfkörper mit den Wertung „mangelhaft“, „ungenügend“ und „befriedigend“.

#### 4.2.3.3. Auswertung und Diskussion der Entwicklung des Prüfkörpers

Bei der Betrachtung der erzielten Ergebnisse fällt auf, dass nur eine der Prüfkörperserien (Nummer 20) das Prädikat „sehr gut“ erhält und auch nur eine weitere (Nummer 18) „gut“ erreicht (Abb. 17).

Nahezu die Hälfte befindet sich im Bereich eines „befriedigend“, während 45 % bei „schlecht“ und „mangelhaft“ liegen (Abb. 17).

Betrachtet man die einzelnen Kriterien genauer, so fällt auf, dass die Kategorie Ausfließverhalten mit einem Durchschnittswert von 1,7, sowie das Kriterium der Reproduzierbarkeit (1,1 im Durchschnitt) die Anforderungen beschreiben, welche am schwierigsten zu erfüllen sind. Dennoch sind es genau jene, die am wichtigsten sind, deshalb die hohen Multiplikations-Faktoren (Tab. 2).

Es scheint bezüglich dieser beiden Kriterien auch kaum eine Rolle zu spielen, wie der Prüfkörper in der Muffel liegt (horizontal oder vertikal), genauso die Abnahme oder Zunahme der Größenverhältnisse der Retentionsquadrate.

Auswirkung scheint aber die Geometrie, bzw. der Verlauf der Ausgussrichtung zu haben. Ein linearer, geradliniger Verlauf ist trotz obengenannter Variationen nicht so hinderlich, wie eine „um-die-Ecke“-Fluss. Muss dann das Metall erst ein bestimmtes Areal mit nicht linearem Verlauf durchfließen, um dann durch eine schmale Verbindung ein weiteres, noch größeres zu erreichen, dann erhält man einen Prüfkörper, der in der Kategorie Ausfließverhalten und Reproduzierbarkeit einen hohen Wert erreicht. Die Nummern 18 und 20 bestätigen diese Feststellung.

Das Kriterium der Auswertbarkeit ist mit einem Schnitt von 3,55 die scheinbar am besten zu erfüllende Anforderung. Hierbei gilt je einfacher und schneller, desto besser. Ein simples Auszählen der ausgeflossenen Quadrate, bezüglich der Gesamtzahl, lassen eine recht zügige prozentuale Aussage treffen. Erschwert wird diese Auswertung durch Anteile, welche erst aufwendig gemessen oder geschätzt werden müssen, wie unregelmäßige Quadrate innerhalb des Prüfkörpers oder dünn auslaufende Verlängerungen. Eine günstige Variante beschreiben Nummer 1 bis 4 und 17 bis 20, während Nummern 5 bis 7 als schlecht anzusehen sind (Tab. 2).

Anwendung und Herstellung sind mit einem relativ niedrigen Multiplikationsfaktor die etwas weniger bedeutsamen Kriterien. Ihr Durchschnitt von jeweils 2,6 beschreibt jedoch, dass ein Erfüllen dieser beiden nicht ohne weiteres erreicht wird. Das Anstiften mit einem definierten Gusskanal ist doch deutlich leichter, als das Verwenden mehrerer Gusskanäle. Genauso sollte der Körper ein praktikables Einbetten zulassen und dieses nicht durch eine Überdimensionierung erschweren oder aufgrund des überragen des Muffelrandes ein „Verlängern“ jener erfordern. Als Beispiel für ein günstiges Handling dient Nummer 15,16 und 20, als Gegensatz dazu sind Nummer 10 und 20 zu betrachten. Die Herstellung sollte schnell und simpel zu vollziehen sein, ohne dass man komplizierte Formen ausschneiden oder gar aneinander wachsen muss (siehe Nummern 5 bis 7 als ungünstige Varianten und Nummer 1 und 18 als vorteilhafte) (Tab. 2).

Bei diesen ganzen Resultaten sollten man jedoch mögliche Fehlerquellen beachten, die nicht gänzlich auszuschließen waren. So ist unter anderem das Mischverhältnis von Einbettpulver und Flüssigkeit trotz Waage und Messbecher niemals hundertprozentig identisch. Die Folge davon sind eventuelle Einflüsse auf den Guss.

Dasselbe gilt für das Wachsaustreiben und Vorwärmen. Hierbei wird sicherlich nicht jede Muffel auf die Minuten genau gleich vorgewärmt, bzw. beim Wachsaustreiben identisch lange im Ofen stehen gelassen.

Auch der Außentemperatur beim Einbetten ist ein möglicher, verfälschender Einfluss zuzuordnen. Bei sehr warmen Temperaturen verzieht sich das Wachs leichter als bei kühleren. Diesem wirkte man entgegen, indem einzelne Entwurfsreihen zur selben Tageszeit eingebettet wurden. Auch der Transport der Muffeln zum Labor erfolgte bei jeder Versuchsreihe gemeinsam, um gleicher Verhältnisse zu schaffen.

Abschließend ist den Nummern 15 und 16 eine besondere Betrachtung zuzukommen. Diese stellen die Meyer-Ronden und das damit verbundene MBS-System dar. Im Gegensatz zu den Untersuchungen von SUSZ [42, 68] ist das Ergebnis hier als eher ungünstig zu bewerten, bezüglich der Verwendung als adäquates Prüf- und Vergleichssystem. Damit scheint sich die in der Problemstellung (Kapitel 3) angegebene These, dass das MBS-System heutzutage den Anforderungen nicht mehr genügt, zu bestätigen.

Durch die Verwendung und Kombination mehrerer Meyer-Ronden in einem Guss könnte man bessere Ergebnisse erzielen, jedoch ist die Anwendung dann erheblich komplizierter. Auch die Vergleichbarkeit verschiedener Güsse leidet dadurch, da ein reproduzierbares Anbringen mehrerer Ronden deutlich aufwendiger ist. Man schafft sich also hierdurch zusätzliche, unnötige Fehlerquellen.

Abschließend kann jedoch durchaus behaupten werden, dass eine Guss-Schmelz-Legierungs-Kombination, bei der die Meyer-Ronden ausfließen, auch in der Lage ist, die für die Zahnmedizin benötigten Güsse erfolgreich durchzuführen.

#### 4.2.4 Zusammenfassung

Aus den nun vorliegenden Ergebnissen lässt sich relativ eindeutig der günstigste Prüfkörper ermitteln. Die Nummer 20 (Abb. 16) mit einem PWI von 4,78 (Tab. 2) und guten Resultaten bei den wichtigsten Faktoren stellt den zu findenden Körper dar.

Bei der Verwendung dieses Entwurfs ist darauf zu achten, dass man ihn so behandelt und vorbereitet, wie es auch bei der Entwicklung der Fall war. So ist auf die horizontale Lage des Prüfkörpers in der Muffel zu achten, ohne diese zu berühren. Außerdem sollte der Gusskanal nicht länger als 1 cm sein. Der Abstand zum oberen Muffelrand betrug bei den Entwürfen etwa 2-2,4 cm. Dies alles ist unbedingt einzuhalten, um adäquate Ergebnisse zu erzielen, die ein Vergleichen und Bewerten zulassen.

Zudem wurde bei den Versuchen drauf geachtet, dass während des Giessens die längere Seite des Körpers immer senkrecht lag. Hierdurch sollte möglichen Verfälschungen vorgebeugt werden.

Um das zu gewährleisten ist es nötig direkt nach dem Einbetten die Lage durch eine entsprechende Markierung in der Einbettmasse zu kennzeichnen.

Da dieser Prüfkörper die Basis für sämtliche Folgeversuche darstellt, war eine Verifizierung desselben nötig. Hierfür wurden vier weitere Prüfkörper unter den genannten Bedingungen hergestellt und gegossen. Das dabei erhaltene Resultat bestätigte die vorherigen Ergebnisse.

### 4.3. Gussversuche

#### 4.3.1 Übersicht und Planung

Der letztendlich ermittelte Prüfkörper (Nr. 20) sollte nun benutzt werden, um zehn verschiedene Gussmaschinen mit unterschiedlichem Schmelz und Gießverfahren zu vergleichen. Die verwendeten Geräte sind unter 4.1.2.1 ausführlich vorgestellt, deshalb hier nun eine kurze tabellarische Zusammenfassung:

| <i>Hersteller</i> | <i>Gerätebezeichnung</i>    | <i>Art des Schmelzens</i> | <i>Art des Gusses</i> |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| BEGO              | Nautilus CC                 | HF-Induktion              | Vakuumdruckguss       |
| BEGO              | Nautilus MC+                | HF-Induktion              | Vakuumdruckguss       |
| BEGO              | Nautilus T                  | HF-Induktion              | Vakuumdruckguss       |
| BEGO              | Fornax G                    | HF-Induktion              | Schleuderguss         |
| BEGO              | Fornax T                    | HF-Induktion              | Schleuderguss         |
| BEGO              | Fundor T                    | Flamme                    | Schleuderguss         |
| Degussa           | Motorcast compact           | Flamme                    | Schleuderguss         |
| Degudent          | Degumat                     | Lichtbogen                | Schleuderguss         |
| Girrbach          | Neocast                     | HF-Induktion              | Schleuderguss         |
| Linn              | Induktherm HFS 3 - Standard | HF-Induktion              | Schleuderguss         |

Tab. 4: Gussmaschinenübersicht

Sechs der zu testenden Maschinen befanden sich in Bremen bei der Firma BEGO. Die anderen vier stellten unabhängige Labore in Berlin zu Verfügung.

Um eine statistisch aussagekräftige Anzahl an Prüfkörpern und damit Gussresultaten zu erhalten, wurden für jede Apparatur acht Wachmodellationen hergestellt und eingebettet. Bei dieser Menge ist ein eventueller Fehlguss schnell von der Norm zu differenzieren und abzugrenzen. Da es verständlicherweise nicht möglich war alle Güsse an einem Tag durchzuführen, wurde diese Arbeit auf zwei Etappen verteilt. Erst die BEGO-Maschinen, dann folgten die restlichen vier.



#### 4.3.2 Vorbereitende Maßnahmen

Jede Testserie wurde gemeinsam modelliert und angestiftet (1 cm Anstiftwachs). Die Prüfkörper wurden auf ihre genaue Lage in der Muffel überprüft und verglichen.

Um Fehlgüssen und Verfälschungen vorzubeugen ist es besonders beim Einbetten nötig, so sorgfältig wie möglich zu arbeiten. Hierzu gehört, dass jeder Prüfkörper mit demselben Pulver-Flüssigkeitsverhältnis eingebettet wird. Das bedeutet, dass für jede Muffel 400 gr Pulver (Wirovest<sup>®</sup>) und 60 ml Flüssigkeit (BegoSol<sup>®</sup> 90 %ig und destilliertes Wasser) verwendet wurde. Das Anmischen erfolgte mit einem Vakuumgerät.

Da ein Austrocknen der Einbettmasse unbedingt vermieden werden musste, wurden sämtliche Prüfkörper maximal einen Tag vor dem Einbringen in den Vorwärmofen eingebettet, anschließend in angefeuchtete Tücher gewickelt und dann in luftdichten Beuteln transportiert.

Das Wachs austreiben war für alle Versuchsreihen gleich. Die Muffeln wurden für 45 Minuten bei 300 °C gehalten, um ein rückstandsloses Ausschmelzen des Waxes zu garantieren.

Das folgende Vorwärmen geschah schrittweise. Ein Einreißen durch zu schnelles Aufheizen der Einbettmasse sollte hierdurch entgegengewirkt werden. Ausgehend von den 300 °C wurde die Temperatur für nochmalige 45 Minuten mit 7 °C/min auf etwa 600 °C erhöht, um dann in der dritten Stufe die benötigten 1000 °C zu erreichen.

### **4.3.3 Versuchsaufbau & Guss**

#### **4.3.3.1 Vorbereitung**

Für jede Muffel lagen zwei Gusszylinder Wironit extrahart bereit. Beim Erreichen der Vorwärmtemperatur wurden diese dann mit dem gerätentsprechenden Schmelzverfahren geschmolzen. Bei etwa 1300 °C begann dann die gesamte Legierung in den flüssigen Zustand überzugehen.

Hatte das System die optimale Gießtemperatur für Wironit extrahart bei 1420 °C erlangt, konnte man mit dem Gießen beginnen.

Eine genaue Temperaturbestimmung der flüssigen Legierung ist bei den Flammengussverfahren, aufgrund der fehlenden Gradzahlregulierung, nicht möglich. Zudem wird das Metall nicht gleichmäßig erwärmt. Stattdessen kommt es zu lokalen Unterschieden.

Es kann also durchaus eine unzureichende Aufschmelzung bei zu geringer Erwärmung des Metalls vorliegen. Häufiger entstehen jedoch lokal deutlich zu hohe Temperaturen. Hierbei besteht die Gefahr der partiellen Überhitzung und Oxidation, sowie die Möglichkeit des Verzunders von Legierungs-Bestandteilen. Dieses wiederum hat entscheidende Auswirkungen auf die Metallqualität und Haltbarkeit von Verblendungen.

#### **4.3.3.2 Guss**

Je nach Gerät erfolgte das Gießen unterschiedlich, jedoch immer nach Herstellerangaben. Bei den Schleuderguss-Maschinen wurde beim Erreichen der benötigten Temperatur und dem damit verbundenen ausreichendem Aufschmelzen der Legierung, die genügend vorgewärmte Muffel in die entsprechende Position gebracht. Hierbei galt es die Lage des Prüfkörpers, markiert in der Einbettmasse, zu beachten. Auf ein zügiges Überführen der Muffel in die Gussvorrichtung war zu achten, da die Einbettmasse ansonsten eine zu große Abkühlung erfahren würde und das Metall somit nicht mehr optimal fließen könnte.

Zu erwähnen ist, dass die Neocast (Girrbach), sowie auch die Induktherm (Linn) Schleuder zusätzlich während des Gusses noch mit einem Vakuumverfahren arbeiten. Beim Einströmen der Schmelze entstehende Gase der Einbettmasse sollen hierdurch entfernt werden.

Bei den Vakuumdruckgussvarianten wird entweder manuell oder elektronisch gesteuert, wann genau die Schmelze in die Muffel unter Druck überführt werden soll. Der Verantwortliche kann sich sowohl durch die Temperaturanzeige, als auch durch optische Kontrolle davon überzeugen, ob und wann die flüssige Legierung zu gießen ist.

#### **4.3.3.3 Nachbearbeitung**

Nach dem Gießen kühlten die Muffeln etwa eine Stunde ab, bevor die Prüfkörper vorsichtig ausgebettet wurden.

Nach dem groben Entfernen der der Einbettmassereste, strahlte man die Körper mit Hilfe des Duostar F1 sorgfältig ab. Hierdurch waren die ausgeflossenen Anteile gut zu beurteilen und auszuwerten.

Ein penibles Einsortieren und Katalogisieren der Güsse diente der Vermeidung von falschen Zuordnungen.

#### 4.3.4 Ergebnisse

##### 4.3.4.1 Tabellarische und grafische Darstellung

Die je acht Gitter der jeweiligen Güsse einer Versuchsreihe wurden sorgfältig ausgezählt, wobei lediglich komplett ausgeflossene Kästchen angerechnet wurden. Die erhaltenen Werte wurden daraufhin in eine Tabelle überführt. Da der eigentliche Prüfkörper aus 79 Retentionsquadraten besteht, war es nun ein leichtes den ausgeflossenen Anteil in einen prozentualen Wert umzurechnen.

Aus den acht Prozentwerten bildet man dann den zusammenfassenden Mittelwert. Um eine bewertende und einheitliche Aussage über das zu prüfende Gerät machen zu können, benötigt man zusätzlich noch die Standardabweichung, damit auch die Variationsbreite der Güsse dargestellt wird. Daraus resultieren die folgenden Tabellen mit der beschreibenden Statistik.

Die erste der Tabellen (Tab. 5) bietet eine ausführliche Übersicht der Versuchsergebnisse, sortiert nach dem höchsten prozentualen Mittelwert, bzw. der vermeintlich besten Formfüllung. Die genauen Werte der einzelnen Prüfkörper jeder Serie sind im Anhang nachzulesen.

Ergänzt wird die Tabelle noch durch die Informationen über das Maximum und das Minimum der erreichten Prozentwerte bezüglich des Ausfließverhaltens einer Testreihe.

Um ein Maß für die Streuung der Messwerte zu erhalten stellt diese Tabelle zusätzlich noch die Standardabweichung und die Varianz dar.

Beide Größen sind ein Maß für die Streuung der Ergebnisse um den Mittelwert herum. Die Standardabweichung hebt die Unterschiede zwischen den einzelnen Streugrößen nicht so stark hervor. Um die größeren Abweichung deutlicher betonen darzustellen, dient die Errechnung der Varianz, da hierbei, aufgrund des Quadratisierens der Streugrößen, kleinere Abweichungen nicht so stark ins Gewicht fallen wie die weiter entfernten.

| <b>Maschinen</b>                     | <b>Mittelwert</b> | Minimum | Maximum | <b>Standard-<br/>abweichung</b> | <b>Varianz</b> |
|--------------------------------------|-------------------|---------|---------|---------------------------------|----------------|
| <b>Fundor T</b>                      | <b>96 %</b>       | 89 %    | 99 %    | <b>3 %</b>                      | <b>9</b>       |
| <b>Induktherm HFS-3<br/>Standard</b> | <b>81 %</b>       | 62 %    | 97 %    | <b>11 %</b>                     | <b>122</b>     |
| <b>Degumat</b>                       | <b>75 %</b>       | 57 %    | 86 %    | <b>9 %</b>                      | <b>74</b>      |
| <b>Nautilus T</b>                    | <b>65 %</b>       | 51 %    | 80 %    | <b>11 %</b>                     | <b>131</b>     |
| <b>Fornax T</b>                      | <b>58 %</b>       | 53 %    | 63 %    | <b>3 %</b>                      | <b>12</b>      |
| <b>Neocast</b>                       | <b>54 %</b>       | 41 %    | 62 %    | <b>8 %</b>                      | <b>57</b>      |
| <b>Nautilus CC</b>                   | <b>46 %</b>       | 44 %    | 48 %    | <b>2 %</b>                      | <b>4</b>       |
| <b>Motorcast compact</b>             | <b>42 %</b>       | 29 %    | 65 %    | <b>12 %</b>                     | <b>153</b>     |
| <b>Fornax G</b>                      | <b>41 %</b>       | 34 %    | 51 %    | <b>6 %</b>                      | <b>31</b>      |
| <b>Nautilus MC Plus</b>              | <b>34 %</b>       | 13 %    | 58 %    | <b>16 %</b>                     | <b>240</b>     |

Tab. 5: Ergebnisse sortiert nach Mittelwert

Überführt man die Mittelwerte in eine Grafik (Abb. 18), so erhält man eine weit übersichtlichere Darstellung der Ergebnisse.

Auf der x-Achse wird das untersuchte Gerät markiert, während die y-Achse den dazugehörigen prozentualen Mittelwert wiedergibt.

Ergänzt wird die Grafik durch die Anzeige der jeweiligen Standardabweichung.

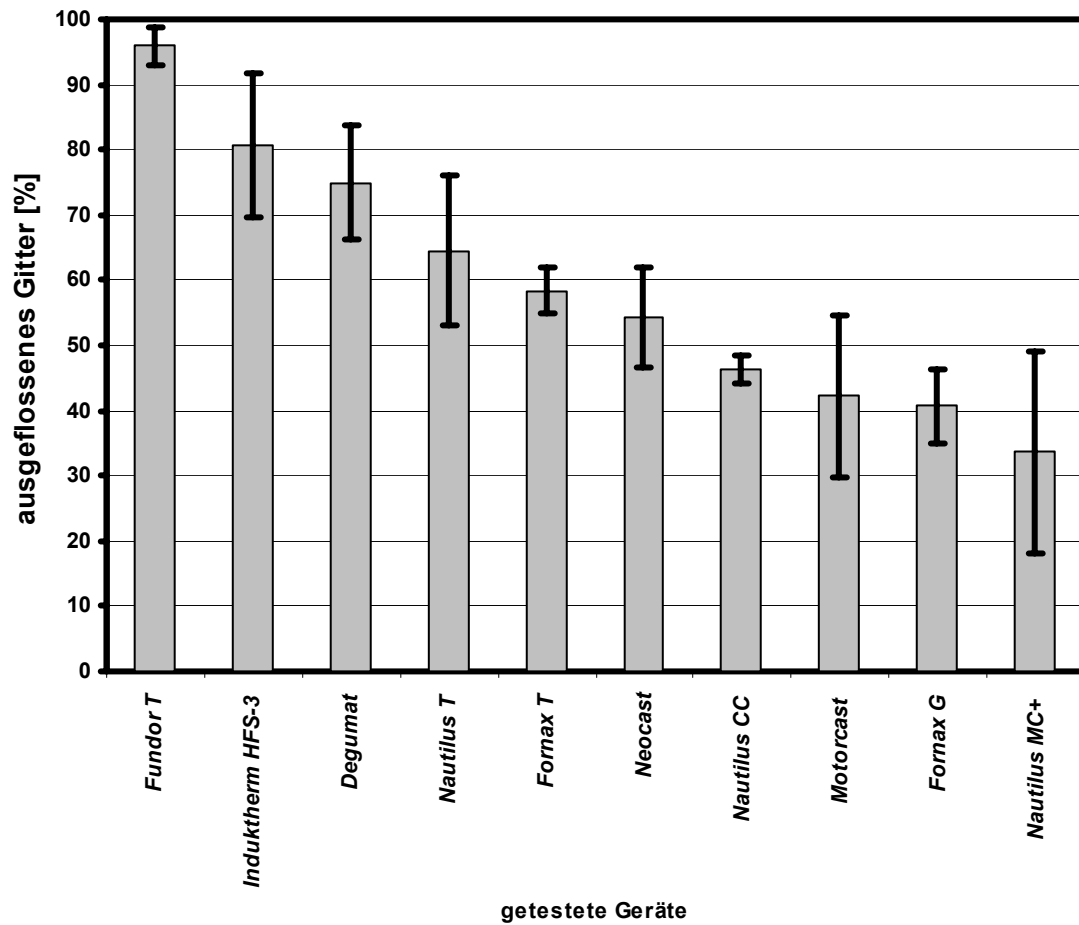


Abb. 18: Balkendiagramm zur Darstellung des Ausfließverhaltens der untersuchten Gießgeräte

Die folgenden Tabellen zeigen nun die Ergebnisse sortiert nach Gussverfahren (Schleuder, bzw. Vakuum-Druckguss). Auf die Darstellung der einzelnen Prüfkörper, sowie dem Maximum und Minimum wird aufgrund der Übersicht verzichtet. Diese Werte sind in Tab.5 nachzulesen.

Tabelle 6 stellt die nach Mittelwert sortierten Ergebnisse beim Schleuderguss-Verfahren dar, während Tabelle 7 die Werte für das Vakuum-Druckguss-Verfahren wiedergibt.

| Maschinen         | Mittelwert | Standard-abweichung | Varianz |
|-------------------|------------|---------------------|---------|
| Fundor T          | 96 %       | 3 %                 | 9       |
| Induktherm HFS-3  | 81 %       | 11 %                | 122     |
| Degumat           | 75 %       | 9 %                 | 74      |
| Fornax T          | 58 %       | 3 %                 | 12      |
| Neocast           | 54 %       | 8 %                 | 57      |
| Motorcast compact | 42 %       | 12 %                | 153     |
| Fornax G          | 41 %       | 6 %                 | 31      |

Tab. 6: Ergebnisse bei Schleuderguss

| Maschinen        | Mittelwert | Standard-abweichung | Varianz |
|------------------|------------|---------------------|---------|
| Nautilus T       | 65 %       | 11 %                | 131     |
| Nautilus CC      | 46 %       | 2 %                 | 4       |
| Nautilus MC Plus | 34 %       | 16 %                | 240     |

Tab. 7: Ergebnisse bei Vakuum-Druckguss

In den beiden folgenden Tabellen erfolgt eine Unterteilung nach Schmelzverfahren. So beschreibt die Tabelle 8, die Ergebnisse beim Hochfrequenz-Induktions-Schmelzen, während Tabelle 9 die Werte für das Schmelzen mit der Flamme wiedergibt. Tabelle 10 präsentiert das Resultat für das Lichtbogen-Verfahren.

| Maschinen        | Mittelwert | Standard-abweichung | Varianz |
|------------------|------------|---------------------|---------|
| Induktherm HFS-3 | 81 %       | 11 %                | 122     |
| Nautilus T       | 65 %       | 11 %                | 131     |
| Fornax T         | 58 %       | 3 %                 | 12      |
| Neocast          | 54 %       | 8 %                 | 57      |
| Nautilus CC      | 46 %       | 2 %                 | 4       |
| Fornax G         | 41 %       | 6 %                 | 31      |
| Nautilus MC Plus | 34 %       | 16 %                | 240     |

Tab. 8: Ergebnisse beim Schmelzen mit Hochfrequenz

| Maschinen         | Mittelwert | Standard-abweichung | Varianz |
|-------------------|------------|---------------------|---------|
| Fundor T          | 96 %       | 3 %                 | 9       |
| Motorcast compact | 42 %       | 12 %                | 153     |

Tab. 9: Ergebnisse beim Schmelzen mit der Flamme

| Maschinen | Mittelwert | Standard-abweichung | Varianz |
|-----------|------------|---------------------|---------|
| Degumat   | 75 %       | 9 %                 | 74      |

Tab. 10: Ergebnisse beim Schmelzen mit Lichtbogen



#### 4.3.4.2 Student T-Test

Da sich die einzelnen Ergebnisse einer Prüfreihe einer Normalverteilung folgen, variiert der Mittelwert bedingt durch die Anzahl und Art der Untersuchungen. Das heißt, dass man, obwohl man jeweils dasselbe Gerät genauso häufig und gründlich testet, verschiedene Mittelwerte erhalten kann, abhängig von der Lage der Einzelergebnisse, innerhalb der Normalverteilung, zum Mittelwert. Daraus lässt sich wiederum ableiten, dass der alleinige Vergleich zweier Mittelwerte keine Aussage über Vor-, bzw. Nachteile der beiden Versuchssysteme zulässt, könnte es doch möglich sein, dass bei einer anderen Testreihe die Mittelwerte gleich oder sogar genau umgekehrt sind, ohne dass hierbei Fehler unterlaufen sind.

Um dennoch die Ergebnisse gegeneinander abzuwägen gibt es den Student T-Test. Hierbei ermittelt man anhand der Einzelergebnisse eine Wahrscheinlichkeit, mit der diese beiden Versuchreihen auf denselben Mittelwert hinauslaufen. Es wird dabei definiert, dass ab einer Wahrscheinlichkeit von unter 0,05 (5 Prozent), die beiden Mittelwerte als signifikant unterschiedlich gelten. Das bedeutet, dass diese auch bei einer deutlich höheren Anzahl an Prüfkörpern der jeweiligen Reihe nicht auf den gleichen Mittelwert hinauslaufen, somit unterschiedlich und gegeneinander vergleichbar sind.

Nun lässt sich eine statistisch vollständige, abschätzende Auswertung und eine adäquate Aussage über die herausgefundenen Resultate stellen. Da mehr als nur zwei Mittelwerte mittels T-Test miteinander zu vergleichen waren, wurde eine Kreuztabelle (Tab. 11), aus der man die einzelnen Testsergebnisse erkennen kann, angefertigt. Als Voraussetzung galt, dass sich alle Ergebnisse innerhalb einer Normalverteilung befanden.

Um die Darstellung der Tests repräsentativer zu gestalten, wurden die Ergebnisse in Prozent umgerechnet. Resultate über der 5 %-Marke sind deutlich hervorgehoben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde beim unteren Teil der Tabelle auf Prozentzahlen verzichtet und die Werte über 5 % stattdessen durch „n.s.“ (nicht signifikant), die übrigen durch ein \* ersetzt.



#### **4.3.4.3 Vergleich der Gießgeräte**

Es zeigt sich, dass die verschiedenen Gießgeräte unterschiedliche Ausfließverhalten aufweisen (Abb. 18). Dies offenbart sich in den unterschiedlichen Mittelwerten und Standardabweichungen. Die Ausfließverhalten einiger Systeme unterscheiden sich nicht signifikant. Die Standardabweichungen liegen zwischen 3 und 16 %.

Der gewählte Prüfkörper wird abhängig von den Gießsystemen zwischen fast 100 und 20 % ausgefüllt, wobei kein Unterschied zwischen Aufschmelzverfahren oder zwischen Schleuder- und Vakuum-Druck-Guß-Systemen zu erkennen ist, d. h. es ist keine Gruppenbildung möglich.

Von der Mehrheit der Gießsysteme wird die Anforderung erfüllt, den Prüfkörper nicht vollständig oder gar nicht zu füllen.