

5 Diskussion

5.1 Fehlerdiskussion

Trotz der Beachtung aller möglichen Gebrauchsrichtlinien der verwendeten Materialien und Geräte, sowie der sorgfältigen Herstellung der Prüfkörper sind Fehler nicht zu vermeiden. Man darf diese nicht bei der Betrachtung der Resultate außen vor lassen, stellen sie doch ebenfalls eine das Gesamtergebnis stark beeinflussende Größe da, wie bereits unter anderem WHITLOCK bei der Entwicklung seines Prüfsystems bemerkte [74].

Diese Fehler können bereits bei der Herstellung der Prüfkörper, sowie der Vorbereitung für den Guss auftreten. Auch die Methode des Auswertens der Gussergebnisse kann welche beinhalten.

Durch das kritische Aufsuchen von möglichen Fehlerquellen kann zudem eine Vermeidung oder zumindest Eindämmung dieser möglich sein.

Abschließend gilt es zu begutachten inwieweit die Resultate auf den Praxis- / Laboralltag übertragbar sind.

5.1.1 Herstellung der Prüfkörper

Allgemein sollte man bei der Betrachtung der Ergebnisse bedenken, dass jeder Wachsprüfkörper per Hand modelliert und angestiftet wurde. Sicherlich kommt es hierbei, trotz sorgfältigster Kontrolle, immer wieder zu kleinen Unterschieden, kein Prüfkörper innerhalb einer Serie gleicht dem anderen hundertprozentig.

Im ungünstigsten Fall könnte es bei der Herstellung zu einer falschen Modellation kommen. Sollte dieser Fehler vor dem Giessen unentdeckt bleiben, so kann das erhaltene Resultat nicht gewertet werden und eine Neuherstellung der Versuchsreihe wäre nötig. Jedoch ist es ebenfalls möglich, dass der Fehler auch bei der Auswertung nicht auffällt und man hat eine unbemerkte Verfälschung der Resultate. Durch eine mehrfache Kontrolle durch unabhängige Personen, sowie durch den Doktoranden selbst, wurde versucht diese Fehlerquelle einzuschränken. Dennoch stellt dieser Umstand die wohl größte Fehlerquelle bei der Herstellung da.

Da die Prüfkörper zudem aus graziellem Wachsretentionsgitter gefertigt wurden und teilweise äußerst dünne Anteile enthalten sind Unterschiede innerhalb der Prüfkörperserien, die durch minimale unterschiedliche dreidimensionale Verwindungen zustande kommen, möglich. Auch hier wurden Kontrollen mehrerer Personen angewendet, um dieses einzudämmen. Auf die Nähe möglicher Wärmequellen (z. B. Heizkörper), welche eine Verformung begünstigen, wurde geachtet.

Um die bereits eben erwähnten Temperatureinflüsse, die besonders bei der Herstellung der Wachskörper zu Unterschieden führen können, weiter einzuschränken, wurden sämtlicher Prüfkörper einer Serie direkt hintereinander modelliert, angestiftet und eingebettet. Dieser Fehler wurde hierdurch auf ein Minimum reduziert und hat somit kaum Auswirkungen auf die Resultate.

5.1.2 Fehler bei der Gussvorbereitung und dem Einbetten

Der beim Anstiften des Prüfkörpers verwendete Wachsgussstift ist ebenfalls Temperatureinflüssen unterworfen und kann sich verformen. Jedoch sollte dies aufgrund des Durchmessers (3 mm) des Stiftes vernachlässigbar sein.

Deutlich größeren Einfluss hat die eigentliche Verbundstelle zwischen Prüfkörper, Stift und Muffelsockler. Es kann dabei leicht zu doch erheblichen Unterschieden der Dicke und Kontaktfläche kommen. Dieses wiederum hat erheblichen Einwirkungen auf das Ausfließverhalten der Legierung. Nur durch Selbstkontrolle und Sorgfalt lässt sich dieser Fehler eindämmen. Jedoch wird man diesen nicht völlig eliminieren können.

Eine weitere Ungenauigkeit findet sich bei der Platzierung des angestifteten Prüfkörpers in der Muffel. Eine hundertprozentige Übereinstimmung innerhalb einer Serie ist auch hier nicht möglich.

Da die Anmischflüssigkeit aus zwei Bestandteilen (BegoSol 90 %ig und destilliertem Wasser) besteht, kann es beim Ansetzen dieses Gemisches zu leichten Schwankungen in der Zusammensetzung kommen. Durch das gründliche Abmessen der Bestandteile mit Messbechern, reduzierte man diese Fehlerquelle.

Ebenso kann es beim Vermischen des Einbettpulvers mit der Flüssigkeit zu Abweichungen der Einbettmasse und damit auch zu unterschiedlichen physikalische Eigenschaften (Expansion, Kontraktion, Härte) kommen. Auch hier wurde auf das genaue Abwiegen und Messen der Bestandteile geachtet. Da dieser Fehler sich jedoch mehr auf die Qualität als auf die Quantität des Gusses auswirkt, fällt er für diese hier verwendeten Versuche nicht so schwer ins Gewicht.

Zwei bedeutende Fehler können beim eigentlichen Einbettvorgang auftreten. So kann es zum einen zur mangelhaften Ausbildung des Vakuums, aufgrund gerätspezifischer Probleme oder Undichtigkeiten kommen. Zum anderen ist der Abriss des Körpers vom Gussstift oder vom Sockelformer möglich. Nur durch vorsichtige Zugabe der angemischten Einbettmasse ist ein Verhindern erreichbar.

Um ein Austrocknen der ausgehärteten Einbettmasse bis zum Guss und der damit verbundenen Rissgefahr entgegenzuwirken, wurde diese bis zur Weiterverarbeitung in feuchtem Milieu aufbewahrt.

5.1.3 Fehler beim Gussvorgang

Beim Gussvorgang kann es besonders bei der Schmelzung der Legierung zu Fehlern kommen. Sowohl ein Überhitzen, als auch zu geringe Wärmezufuhr haben deutlichen Einfluss auf das Resultat. Es gilt die korrekte und optimale Gießtemperatur zu erreichen und nicht zu überschreiten.

Die in dieser Arbeit verwendeten Geräte sind hierbei unterschiedlich zu verwenden. Einige machen es dem Anwender durch eine Gießzeitpunkterkennung leichter (Nautilus MC Plus, Nautilus T, Nautilus CC). Durch die vorherige Eingabe der Legierungsspezifischen optimalen Gießtemperatur starten diese Geräte beim Erreichen dieser automatisch den Guss. Durch eine zusätzliche optische Kontrolle kann dieser Vorgang zusätzlich kontrolliert werden. Mit Hilfe dieser Technik ist diese Fehlerquelle auf ein Minimum zu reduzieren.

Bei Geräten die ohne eine zusätzliche Gießzeitpunkterkennung arbeiten, muss die Temperatur ebenfalls vorher eingestellt werden, jedoch muss der Anwender visuell bestimmen, wann die Schmelze ihre optimale Konsistenz erreicht hat, um dann manuell den Gussvorgang zu starten. Hierbei ist die Möglichkeit eines Fehlers natürlich deutlich größer einzuschätzen.

Besonders deutliche Auswirkungen hat diese Fehlerquelle auf Gießvorgänge, bei denen die Legierung mit Hilfe einer Flamme manuell geschmolzen wird (Motorcast compact, Fundor T). Durch die nicht einheitliche Erwärmung der Legierung kommt es rasch zu partiellen Überhitzungen. Hierdurch steigert sich deutlich die Quantität des Gusses. Jedoch bedingt dieses ebenfalls eine immense Einschränkung der Qualität. Eine unzureichende Schmelzung führt zu massiven Quantitätseinbußen beim Gießen [27]. Diese Schmelz-Guss-Kombinationen sind also für diesen Fehler besonders anfällig und ein Vermeiden desselben ist nahezu unmöglich, ein Einschränken nur bedingt durchführbar.

Ebenfalls sind bei Verwendung unterschiedlicher Legierungschargen Verzerrungen der Resultate möglich. Deshalb wurde jede Versuchsreihe mit derselben Anzahl, Form, Größe und Gewicht der Gusszylinder aus derselben Charge (Charge 61043) durchgeführt.

Auch die Gusstiegel können sich prinzipiell auf den Guss auswirken. Durch Alterung oder aber durch die deren Temperatur verändert sich die Oberfläche der Tiegel. In ungünstigen Fällen könnte hierdurch das Ausfließverhalten der Schmelze aus dem Tiegel beeinflusst werden.

5.1.4 Messfehler der Methode

Auch die Planung und die Durchführung der Methode beinhalten einige Fehlerquellen.

Zum einen ist es doch recht schwer sämtliche beeinflussende Faktoren in einem System bis auf einen konstant zu halten. Diesen Zustand dann auch noch über mehrere Prüfreiheiten hinaus zu stabilisieren, ist nahezu unmöglich. Bestes Beispiel hierfür ist, wie bereits schon unter 5.1.3 erwähnt, das Problem mit der optimalen Gusstemperatur. Diese Art der Einflüsse lässt sich niemals völlig ausklammern und spielt sicherlich eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Auch die Auswertung des gegossenen Prüfkörpers selbst, birgt einige Unpräzisionen in sich. Da lediglich komplett ausgeflossene Kästchen als verwertbar gelten, eine genauere Methode zur Vermessung aller ausgeflossenen Anteile jedoch nicht vorliegt, erleichtert man sich zwar hiermit die Auswertung, im Gegenzug bringt man allerdings gewisse Ungenauigkeiten in das System.

In welchem Maße sich die Gesamtheit der unerwünschten Einflüsse auf das System niederschlägt, sieht man anhand der Standardabweichungen und deutlicher anhand der Varianz (Tab. 5). Fallen doch besonders die Nautilus MC Plus mit einer Varianz von 240,32 und die Degussa Motorcast compact mit 152,59 auf. Diese Werte beschreiben äußerst deutliche Abweichung vom Mittelwert, der sich aus der Auswertung der jeweils acht Prüfkörper pro Serie herausstellte. Eine so hohe Varianz steht somit im Gegensatz zur Reproduzierbarkeit der Resultate. Gerade dieses ist jedoch eine der Forderungen an das Prüfsystem. Es soll reproduzierbare Ergebnisse liefern. Die niedrigen Werte der Nautilus CC (Varianz: 4,38) und der Fundor T (Varianz: 8,71) zeigen wiederum, dass die Methode hierzu in der Lage ist (Tab. 5).

Um ungewollte, das Resultat beeinflussende Faktoren bei dieser Methode zu minimieren, sind sicherlich Prüfserien mit einer höheren Anzahl an Prüfkörper notwendig. Dadurch sind die Fehlerquellen zwar immer noch vorhanden, verlieren aber an Einfluss.

5.1.5 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die praktische Verwertbarkeit der Resultate und damit auch dieses Systems sind zu hinterfragen. Alle der angewandten Maschinen werden in den verschiedensten Laboren verwendet und erfüllen dort auch ihren Zweck. Jedes Labor hat seinen eigenen Ablauf beim Guss und hat seine Geräte und Arbeitsschritte wahrscheinlich gut aufeinander abgestimmt.

Wie bereits in den Kapitel (5.1.1-4) zuvor erwähnt, gilt es bei dieser Methode noch einige beeinflussende Fehlerquellen zu vermindern und deshalb sollte der hier vorliegende Ausfall der durchgeführten Testreihen mit Vorsicht gedeutet werden.

Außerdem hängt der Wert eines Gussvorgangs nicht nur von der eigentlichen Maschine ab. Bei anderen Legierungen oder anderer Vorarbeit kann das Resultat eventuell anders ausfallen.

Deutlich stellt sich die Gießtemperatur als ein wesentlicher Parameter heraus. Diese ist neben dem Schmelzintervall hauptsächlich vom Bediener abhängig. Nur die Nautilus CC misst die reale Temperatur. Bei allen anderen Systemen wird sie mehr oder weniger willkürlich vom Zahntechniker bestimmt. Die Temperatur ist bei den Systemen die mit der Flamme oder induktionsbeheizt arbeiten von der Zeit abhängig. Es ist daher nicht statthaft die Maschinen direkt miteinander zu vergleichen. Dies wäre nur dann möglich, wenn die Gießtemperaturen identisch wären.

Dennoch ist dieser Test in der Praxis sinnvoll, um zu erkennen, ob die jeweils angewandte Gussprozedur effektiv ist. Auf der anderen Seite sind durch Variationen, Optimierungen möglich. Diese kann sich lediglich auf eine Änderung und Abstimmung der Arbeitsvorgänge beziehen, denn es wäre denkbar durch Testreihen zu kontrollieren, ob man zeitliche oder auch materielle Vorteile durch ergänzende oder zusammengelegte Arbeitsschritte erzielen kann. Der Wechsel von Legierung, Einbettmasse oder anderen Materialien kann ähnlich überprüft und eventuell durchgeführt werden. Das gleiche gilt natürlich für Geräte.

Insofern ist dieser Test als Beispiel für die Anwendung des Prüfsystems zu sehen. Mit dieser Kombination an Materialien und Geräten erhält man das unter Tab.5 nachzulesende Resultat. Sicherlich funktioniert jede dieser Maschine auch in der Praxis, aber es gibt einige, die mit den jeweiligen spezifischen Anforderungen besser funktionieren. Weitere Tests mit Variationen der Legierungen oder der Vorwärmtemperatur werden zeigen, ob bei geänderten Bedingungen die Ergebnisse anders ausfallen.

5.2 Diskussion der Messergebnisse

5.2.1 Vergleich der Maschinen

- Fundor T (BEGO) & Motorcast compact (DEGUSSA)

Die hohe Formfüllung der Fundor T-Maschine, trotz relativ simpler Anwendung und weniger zusätzlicher Hilfe, wie etwa eine Gießzeitpunkterkennung, lässt sich wohl auf das Schmelzprinzip mit der Flamme zurückführen. Es ist zu vermuten, dass es aufgrund einer vergleichsweise hohen Gießtemperatur zu einer Erniedrigung der Viskosität kam und somit der Prüfkörper nahezu komplett ausfloss. Eine weiterführende qualitative Prüfung der Guss-Körper dieser Serie im Vergleich zu den übrigen Prüfreiheiten könnte diese Annahme sicherlich untermauern. Bezüglich des Einflussbaums aus Kapitel 2.2.5.1.3 ist hier der Faktor Temperatur als der Prägnanteste zu werten (Tab. 5).

Bei der Motorcast compact scheint sich wiederum ein anderer Verlauf eingestellt zu haben. Hier ist das relativ ungünstige Ergebnis vermutlich auf einen unzureichenden oder partiell unterschiedlichen Schmelzvorgang zurückzuführen. Auffällig bei diesem Gerät sind die hohen T-Werte (Tab. 11) bezüglich der Fornax G (76,39 %) und der Nautilus CC (41,23 %). Diese Werte lassen vermuten, dass sich die Mittelwerte dieser Geräte bei höherer Prüfkörperanzahl noch weiter annähern (Tab. 5).

- Fornax G (BEGO) & Fornax T (BEGO)

Befindet sich die Fornax G bezüglich des Mittelwertes an vorletzter Stelle, so schneidet die mit ähnlicher Konfiguration bestückte Fornax T etwas besser, im Mittelfeld liegend, ab. Die niedrige Standardabweichung und Varianz deuten auf statistisch gut verwertbare Ergebnisse hin (Tab. 5). Die unterschiedlichen Werte sind eventuell durch unterschiedliche Generatoren mit unterschiedlichen Frequenzen und Leistungen erklärbar.

- Nautilus MC Plus (BEGO) & Nautilus T (BEGO) & Nautilus CC (BEGO)

Überraschend bei diesen mit Vakuum-Druckguss und Gießzeitpunkterkennung (außer Nautilus T) arbeitenden Geräten ist das ungünstige Abschneiden der Nautilus MC Plus. Werden doch gerade bei diesem Gerät einige der Fehlerquellen eliminiert und reduziert. Die Nautilus T zeigt mit einem Mittelwert von 65 % im Vergleich zu den übrigen Geräten eine höhere Formfüllung, während die Nautilus CC mit 46 % dagegen etwas abfällt (Tab. 5).

Die mit 240,32 sehr hohe Varianz bei der Nautilus MC plus gibt einen Hinweis darauf, dass die Werte weit gestreut sind und dass der gefundene Mittelwert bei höherer Prüfkörperanzahl sich noch deutlich nach oben verschieben kann. Das könnte das niedrige Resultat erklären. Selbiges gilt für die Nautilus T mit einer hohen Varianz von 130,99 (Tab. 5).

Da die Mittelwerte der beiden Geräte mit Gießzeitpunkterkennung deutlich unterhalb der der Nautilus T liegen, ist zu überprüfen, ob die legierungsspezifischen Angaben korrekt sind und auch so eingestellt wurden. Schwankungen bei der Vakuumbaueinstellung oder des benötigten Drucks bei Gießen könnten Ursachen für die Ergebnisse sein und sind abzuklären, gleiches gilt für die tatsächliche Gießtemperatur (2.2.5.1.3).

- Induktherm HFS 3 Standard (LINN) & Neocast (GIRRBACH)

Beide Geräte arbeiten mit einem Hochfrequenz-Induktionsverfahren, Vakuum und Schleuderguss. Dennoch zeigt die Induktherm eine höhere Formfüllung (Mittelwert: 80,70 %), als das Neocast-Gerät (Mittelwert: 54,27 %). Auch im Vergleich mit der Fornax G & T, welche ebenfalls hochfrequent schmelzen und mit einer Schleuder gießen jedoch ohne Vakuum, erreicht die Induktherm höhere Werte. Als mögliche Erklärung hierfür kann man das Vakuum anführen, welches zum einen die Oxidation der Legierung und zum anderen den Einfluss weiterer Gase auf den Guss, verhindert (Tab. 5).

- Degumat (DEGUDENT)

Die hohe Formfüllung durch das Degumat-Gerät könnte man eventuell auf das verwendete Schmelzverfahren zurückführen. Durch die Anwendung der Lichtbogen-Technik kann es aufgrund der hohen Temperaturen die man damit erreicht, schnell zu einer Überhitzung des Metalls kommen (2.2.2.2), wodurch man ähnlich wie bei den Flammengussgeräten (Motorcast compact und Fundor T) den Effekt erzielt, dass die Quantität zu Ungunsten der Qualität steigt. Weiterführende qualitative Tests würden diese Hypothese abklären.

5.2.2 Eignung des Prüfkörpers

Nach der Durchführung einer kompletten Testprozedur anhand von unterschiedlichen Gussmaschinen unter Anwendung des zuvor entwickelten Prüfkörpers ist eine neuerliche Betrachtung und Beurteilung anhand der oben definierten Anforderungen des Körpers angebracht.

Dieser zeigte eine gute Anwenderfreundlichkeit bezüglich der Handhabung auf. Das bedeutet, dass sich das Positionieren, das Einbetten und das Ausbetten als äußerst einfach darstellten. Es kam hierbei zu keinerlei Brüchen des gegossenen Metalls, sowie auch zu keinen nennenswerten Deformationen der Wachsform beim Einbetten.

Das Auswerten erwies sich als unkompliziert, da es auf simples Auszählen der ausgeflossenen Kästchen hinauslief. Es gab hierbei aufgrund der eindeutigen Definition, dass nur komplett ausgeflossene Kästchen zu werten sind, keinerlei Zweifel über die Beurteilung einzelner Prüfkörper.

Keiner der Körper floss zu einhundert Prozent und keiner zu null Prozent aus. Das spricht für ein gutes Ausfließverhalten bezüglich der Aufgabenstellung. Damit ist die wichtigste vorher definierte Anforderung erfüllt.

Als Nachteil ist die etwas aufwendige Herstellung zu werten, da diese einen erheblichen Zeitaufwand fordert. Solange eine manuelle Herstellung nötig ist, kann man dieses Kriterium nicht außer Acht lassen.

Die Reproduzierbarkeit der Resultate schwankte jedoch sehr. So gab es bei einigen Geräten sehr gut reproduzierbare Ergebnisse, während bei anderen erhebliche Varianzen auftraten. Sicherlich ist dies als ein Nachteil zu werten, den man aber durch konsequente Verminderung von negativ beeinflussenden Faktoren minimieren kann. Im jetzigen Stadium der Entwicklung lässt das Prüfsystem in einigen Fällen (z. B. Nautilus MC Plus) noch keine eindeutigen Aussagen über das Abschneiden zu. Die gewonnenen Resultate sind tendenziell zu deuten und weisen zunächst recht allgemein auf Störfaktoren hin, diese sollten dann durch ergänzende spezifischere Untersuchungen aufgedeckt, analysiert und beseitigt werden.

Grundsätzlich erfüllt das Prüfsystem drei der gestellten Anforderungen ausreichend, während bei der Herstellung und Reproduzierbarkeit noch Verbesserungen anzustreben sind.

Fasst man nun diese gesammelten Fakten zusammen und stellt sich die Frage, ob ein professioneller und weiterführender Einsatz des Prüfkörpers sinnvoll ist, so scheint eine eindeutige Antwort nicht möglich zu sein. Das entworfene Konzept stellt ein ordentliches Grundgerüst dar, dass es durch noch erheblich mehr Versuche, Tests und Optimierungen zu verfeinern gilt. Erst nach diesem Reifungsprozess sollte es absehbar sein, wo das System seine Grenzen und nicht zu behebbenden Schwächen aufweist und dann wird ein abschließendes, fundiertes Urteil möglich sein.

Außerdem gilt es abzuschätzen und durch vergleichende Untersuchungen zu kontrollieren, ob das hier vorgestellte Prinzip dem bereits zur Verfügung stehenden und renommierten MBS-System im direkten Vergleich standhalten kann oder gar unter- oder überlegen ist.

Unabhängig vom Prüfkörper hat sich gezeigt, dass unterschiedliche Gießgeräte zu unterschiedlichen Ergebnissen geführt haben. Ein Vergleich oder gar Bewertung von Gießsystemen ist nicht statthaft. Um dies zu tun, müsste bei identischer Temperatur gegossen werden. Die reale Gießtemperatur ist jedoch bei den allermeisten erhältlichen Geräten nicht ermittelbar.

Um einen Vergleich zu erlauben, müsste eine Vielzahl von Parametern (s. Fehleranalyse im Schrifttum) definiert und vom Prüfer eingehalten werden.

Der entwickelte Prüfkörper ist jedoch sehr wohl in der Lage Unterschiede bei einem Gießsystem zu erkennen. Hier könnte man z. B. verschiedene Anstiftungen zu Prüfen. Ungeklärt ist jedoch bislang der Einfluss der Legierung. Es ist noch zu prüfen, ob auch andere Legierungen z. B. hochgoldhaltige Legierungen ähnliche Ergebnisse aufweisen. Wenn dies der Fall wäre, müsste auch die Legierung (oder Legierungstyp) als Einflussgröße definiert werden und bei vergleichenden Untersuchungen und spätestens beim Vergleichen unterschiedlicher Experimente berücksichtigt werden.