

## Qualität entlang der MIM-Prozesskette

*Frank Petzoldt*

Um qualitativ hochwertige MIM-Serienbauteile mit geringer Ausschussrate zu produzieren ist es nötig, ein umfassendes Prozessverständnis zu entwickeln und eine geeignete Qualitätsüberwachung aufzubauen. Entlang der gesamten MIM-Prozesskette vom Pulver zum fertigen Bauteil gibt es eine Vielzahl von „Stellschrauben“, mit denen man direkten Einfluss auf Fertigungstoleranzen und Materialeigenschaften des Produktes nehmen kann. In diesem Beitrag werden Pulver, Feedstock, Spritzguss, Entbindern und Sintern sowie die unterstützenden Technologien Formfüllsimulation und Nachbehandlung durch HIP betrachtet und deren jeweiliger Einfluss auf die Qualität der Fertigteile diskutiert.

### Einleitung

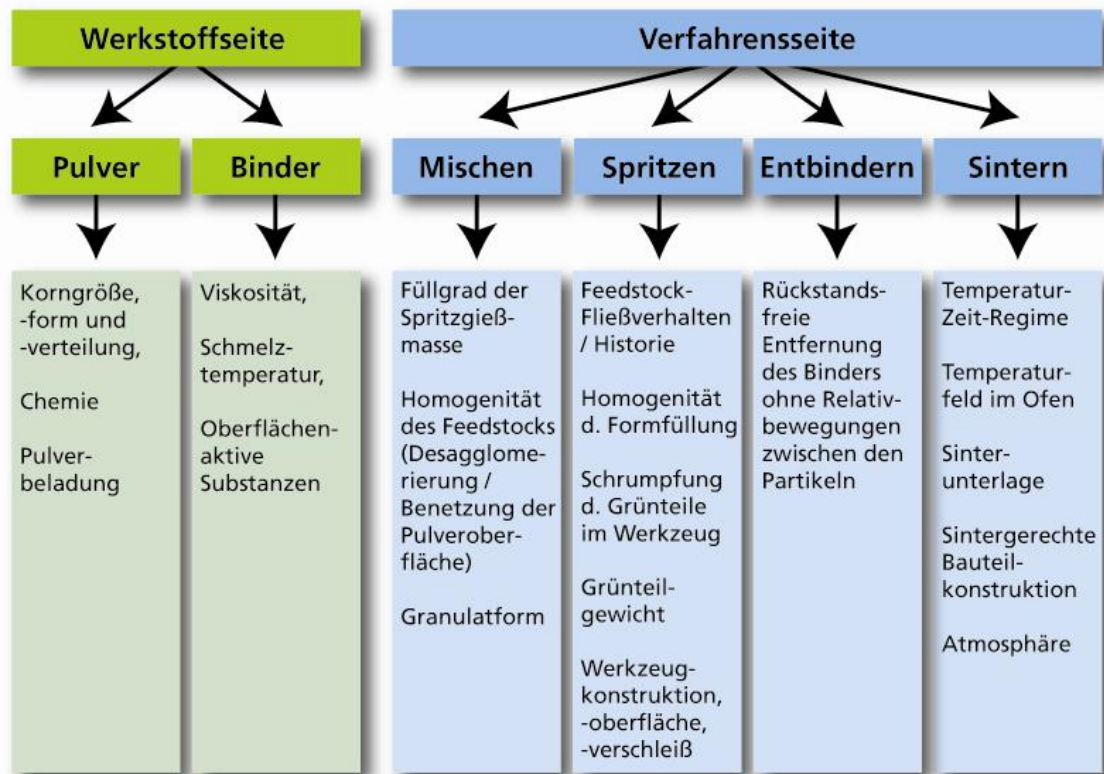
Im Wettbewerb der Fertigungstechnologien ist es für den wachsenden Markterfolg notwendig, dass Metallpulverspritzgießen (MIM) bei gleicher Bauteilqualität kostengünstiger ist als andere konkurrierende Herstellverfahren für komplexe Metallbauteile. MIM bietet darüber hinaus die Chance, Bauteile mit besonderen Design-Merkmalen auszustatten oder die Kombination und Integration von mehreren Funktionen in einem Bauteil umzusetzen.

Das Metallpulverspritzgießen (MIM) ist inzwischen eine reife, weltweit erfolgreiche Fertigungstechnologie, mit deren Hilfe in zahlreichen Branchen komplexe metallische Serienbauteile zuverlässig gefertigt werden. Dank zahlreicher Maßnahmen zur Qualitätssicherung und -verbesserung bei jedem einzelnen Prozessschritt können MIM-Fertigungslinien heutzutage eine sehr geringe Ausschussquote erreichen.

Die Prozesskette Metallpulverspritzguss besteht grundsätzlich aus vier Schritten, dem Mischen von Pulver und Binder zum Feedstock, dem Spritzgießen, dem Entbindern und dem Sintern. Je nach bauteil- oder anwendungsspezifischen Erfordernissen können sich noch Nachbehandlungsschritte wie z.B. das Heißisostatische Pressen (HIP), Oberflächenveredelungen oder auch zerspanende Verfahren anschließen.

Bei jedem Fertigungsschritt entlang der gesamten MIM-Prozesskette gibt es eine Reihe von Faktoren, welche die Eigenschaften und die Qualität des späteren Bauteils positiv oder negativ beeinflussen können und die deshalb durch Qualitätskontrolle zu überwachen sind.

In **Bild 1** sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Qualität von MIM-Bauteilen in den einzelnen Prozessstufen zusammengefasst. Leider sind die einzelnen Einflussfaktoren nicht alle unabhängig voneinander, sodass ein vertieftes



**Bild 1:** Mögliche Einflussfaktoren auf die Qualität von MIM-Bauteilen

Prozessverständnis für das Erreichen einer geringen Ausschussquote von Fertigteilen notwendig ist. In den letzten 20 Jahren ist aus vielen Fertigungsproblemen gelernt worden. Zahlreiche auftretende Bauteildefekte sind inzwischen verstanden und können daher im Vorfeld vermieden werden [1].

Um die dauerhaft zuverlässige Qualität seiner Produkte zu sichern, ist es für den Hersteller von MIM-Bauteilen notwendig, eine möglichst lückenlose Dokumentation der qualitätsbildenden Kriterien sicherzustellen. Dazu setzt beispielsweise GKN Sinter Metals GmbH auf ein eigenes, umfassendes Datenbanksystem [2], das im Zusammenspiel mit der Erfassung von Produktionsdaten aus den Fertigungsanlagen ein lernendes System ist. Anhand der Daten lassen sich chargenspezifische und chargenübergreifende Statistiken erstellen, Vergleiche ziehen und Optimierungsansätze ableiten. Die dafür notwendigen Messdaten werden in jedem Prozessschritt anhand teilespezifischer Prüfpläne erfasst. Ein Prüfplan enthält die zu kontrollierenden Maße, schreibt das jeweilige Messmittel vor und legt die Prüfschärfe fest. Die Erstellung des Prüfplans erfolgt durch autorisierte Mitarbeiter der Qualitätssicherung in Zusammenarbeit mit der Produktion und dem

Kunden. Zu jedem Produktionsauftrag wird auch ein Prüfauftrag aktiviert. Damit sind die eindeutige Zuordnung und die Rückverfolgbarkeit jedes Produktionsloses gewährleistet. Die Abarbeitung des Prüfplans erfolgt parallel zur Produktion. Dabei können Daten ausschließlich in der vorgeschriebenen Reihenfolge eingegeben werden. Die Prüfung von Sinterteilen erfordert beispielsweise eine abgeschlossene Grünteilprüfung. Durch Abschluss und Freigabe aktiviert das System den Prüfplan für den nächsten Prozessschritt. Der beschriebene Qualitätszyklus ist in **Bild 2** schematisch dargestellt und wird im Folgenden in der Betrachtung der einzelnen Prozessschritte näher beleuchtet.



**Bild 2:** GKN Sinter Metals Quality System (GQS) [2]

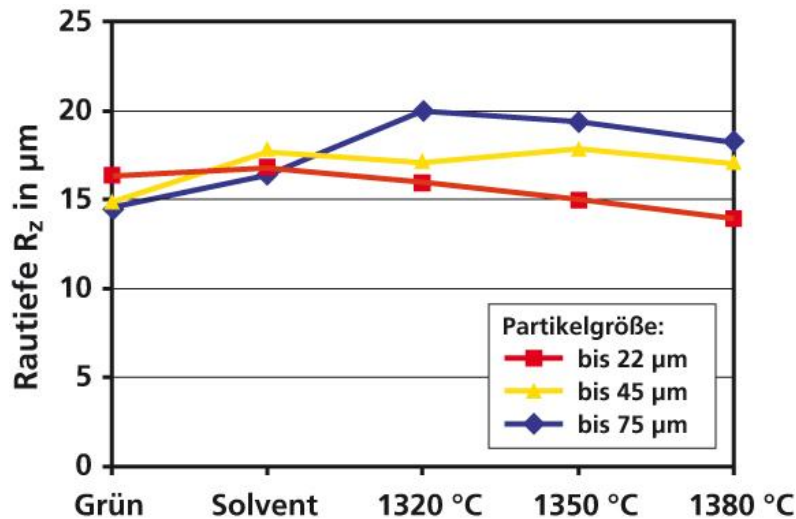
### **Pulver, Binder und Feedstock**

Qualitätssicherung im MIM-Prozess setzt bereits bei der Herstellung der Metallpulver und des spritzgießfähigen Metall-Binder-Gemisches, des sogenannten Feedstocks, ein. Hierbei sind besonders die Homogenität des Feedstocks, seine Gleichmäßigkeit von Batch zu Batch und der Schrumpffaktor als Qualitätsmerkmale zu nennen. Qualitätsschwankungen im Feedstock wirken sich im gesamten Fertigungsprozess aus, können an keiner Stelle korrigiert werden und bewirken letztendlich eine erhöhte Ausschussrate an Sinterteilen.

Am Markt haben sich mehrere Feedstock-Hersteller etabliert, die Pulver-Binder-Gemische (Granulate) „ready-to-mould“ anbieten. Standardwerkstoffe wie Edelstähle und Eisenlegierungen werden in großen Mengen an die Spritzgießfirmen geliefert. Aber auch spezielle Legierungen werden kundenspezifisch angeboten. Der Weltmarkt für Feedstock wird auf derzeit rund 9.000 Jahrestonnen geschätzt, wovon etwa die Hälfte durch Feedstock-Hersteller produziert wird. Unabhängig davon, ob die Feedstock-Herstellung bei einem Vormateriallieferanten oder beim Bauteilfertiger selbst durchgeführt wird, werden alle Eingangsstoffe hinsichtlich

technischer Eigenschaften und chemischer Zusammensetzung gegen festgelegte Spezifikationen umfassend geprüft.

Das Pulver und der Binder werden einer Eingangskontrolle unterzogen und erst nach der erteilten Freigabe verarbeitet. Dabei sind die Partikelgrößenverteilung und die chemische Zusammensetzung des Pulvers wichtige Größen, die einen wesentlichen Einfluss auf den Schrumpf, die Sinterdichte und die Materialeigenschaften haben.



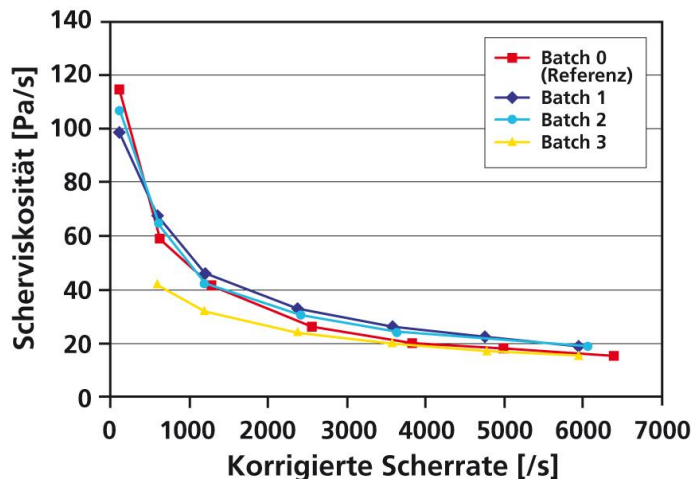
**Bild 3:** Oberflächenrauigkeit in Abhängigkeit von der Partikelgröße und Sinter-temperatur für gasverdüste 316L-Pulver

Beispielhaft ist in **Bild 3** der Einfluss der Partikelgröße auf die Oberflächenrauigkeit des Bauteils dargestellt. Es fällt auf, dass sowohl im Grünzustand als auch nach Lösungsmittel-Entbindern kein Einfluss der Partikelgrößenvariation auf die Rauigkeit erkennbar ist, obwohl die mittlere Partikelgröße zwischen 22 $\mu\text{m}$  und 75 $\mu\text{m}$  variiert. Erst nach dem Sintern wird der Einfluss deutlich. Je größer die durchschnittliche Partikelgröße ist, desto größer ist auch die Rautiefe  $R_z$ . Während dieser Zusammenhang eindeutig ist, sind Unterschiede in der Partikelgrößenverteilung oder Agglomerate in der Pulvercharge schwieriger zu detektieren und haben direkten Einfluss auf die Spritzgussparameter und letztendlich auch auf die Maßhaltigkeit. So ist es offensichtlich, dass feinere Pulver mehr Binderanteil zum Erreichen ähnlicher Viskosität brauchen, was dann automatisch einen anderen Schrumpf des Bauteils nach sich zieht. Neben der zur Festlegung des Schrumpffaktors genau einzustellenden Bindermenge ist es auch wichtig, die einzelnen Binderbestandteile auf gleichbleibende Produktqualität zu testen, da auch Variationen in den Basischemikalien das Verhalten des Feedstocks während des Spritzgießens beeinflussen können.

Nach dem Herstellprozess des Granulates wird der Feedstock auf seinen Binder-gehalt geprüft, um die gleichmäßige Schwindung von Batch zu Batch garantieren zu können. Für die Erarbeitung von Verarbeitungsparametern für einen Feedstock sind rheologische Daten hilfreich. Die Messung der Viskosität wird in einem Kapillarrheometer vorgenommen. Der dabei erfasste Scherratenbereich bis 6.000 1/s entspricht etwa den Verhältnissen auf der Spritzgießmaschine. In **Bild 4** ist die Scherviskosität für unterschiedliche Feedstockbatches dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede von Batch zu Batch zu erkennen. Im Vergleich zum Referenzbatch gibt es Schwankungen der Viskosität. Wie sich diese Abweichungen der Viskositätskurven auf die Verspritzbarkeit des Feedstocks und letztendlich die Bauteilqualität auswirken, ist bisher allerdings nur empirisch zu beantworten. Deshalb wird jeder Feedstock auf seine Verarbeitbarkeit hin auf der Spritzgießmaschine getestet.

Der Qualitätszyklus beim Bauteilfertiger, der den Feedstock „ready-to-mould“ einkauft, beginnt mit der Wareneingangsprüfung des Feedstocks. Hierzu werden Zertifikate überprüft, dokumentiert und mit Stichproben verifiziert. Die typischen Prüfkriterien sind die chemische Zusammensetzung, der Aufmaßfaktor für das Werkzeug sowie der Fließfähigkeitsindex. Mit positivem Abschluss der Kontrolle erhält das Materialbatch die Freigabe zur Produktion.

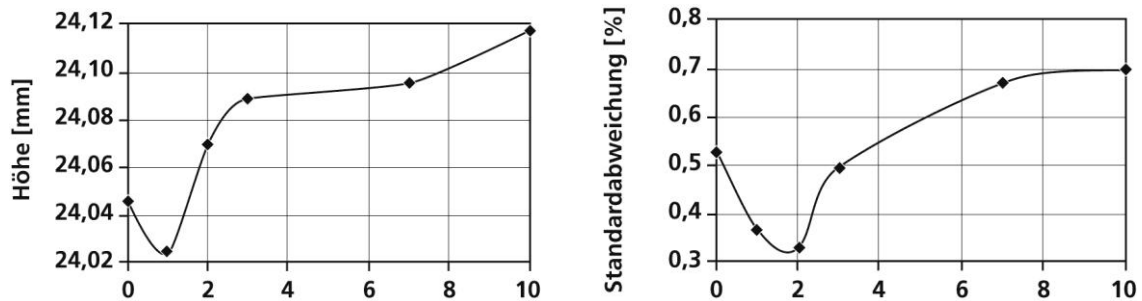
Die Qualitätsüberwachung des Feedstocks rückt beim MIM-Hersteller immer dann wieder in den Vordergrund, wenn es darum geht, bereits einmal verspritzten Feedstock wieder zu rezyklieren, beispielsweise beim Regranulieren von Angüsen oder fehlerhaft gespritzten Grünteilen.



**Bild 4:** Scherviskosität verschiedener Feedstockbatches bei 100 °C

In **Bild 5** ist die Variation der Bauteiltoleranzen nach einer unterschiedlichen Anzahl an Regranuationszyklen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass nach der ersten Regranulation die Maße des Sinterteils etwas abnehmen, was

möglicherweise auf eine Verbesserung der Feedstockhomogenität hinweist. Aber auch nach mehrfachem Regranulieren gibt es Abweichungen in den Maßtoleranzen. Alterungseffekte der Polymere durch die thermischen Zyklen können hierbei eine Rolle spielen.



**Bild 5:** Variation der Höhe (links) und der resultierenden Standardabweichung (rechts) als Funktion der Anzahl der Regranulationen des Feedstocks [3]

Dies bedeutet für die Serienfertigung, immer mit einem konstanten Anteil an Regranulat zu arbeiten. Staubentwicklung durch Regranulierung sollte unbedingt vermieden und das Regranulat möglichst von Feinstaubanteil befreit werden. Die maximale Regranulatgröße sollte nicht größer als die Gangtiefe der verwendeten Schnecke in der Einzugszone sein.

### Spritzgießen

Der überwiegende Anteil der Fehlbildungen am Bauteil – wie Lunker, Luft einschüsse, Entmischungen, unvollständige Formfüllung etc. – passiert beim Spritzgießen und ist oftmals für das bloße Auge unsichtbar. Die Ursachen für solche Fehler sind zahlreich, sie reichen von schlechtem Bauteildesign über ein fehlerhaftes Werkzeug, ungeeignete Spritzgießparameter bis hin zur falschen Bedienung der Spritzgießmaschine. Die während des Spritzgießens entstehenden Fehler sind im weiteren Prozess nicht vollständig auszuheilen und führen daher zu erhöhtem Ausschuss. Die systematische Analyse und Dokumentation der Fehlermöglichkeiten und deren Korrelation zu Qualitätsmerkmalen der spritzgegossenen Bauteile führen zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Prozessstabilität und Verringerung der Ausschussraten in der Produktion [1, 4].

Grundsätzlich sollten die Temperatur am Aufstellort der Maschine und die Kühlwassertemperatur möglichst konstant gehalten werden. Die Zylindertemperaturen müssen gemäß Herstellerangaben der Feedstocks eingestellt werden. Die maximal zugelassene Temperatur darf nicht überschritten werden, da sonst Zersetzungsfahr des Feedstocks droht. Die Dosiergeschwindigkeit sollte so eingestellt werden, dass daraus eine möglichst konstante Dosierzeit resultiert. Zu starke Scherung (durch hohe Drehzahlen oder durch hohen Staudruck) muss beim Dosieren vermieden werden. In allen Heizzonen sollte die Temperatur nie kon-

stant nach oben abweichen. Beim geschwindigkeitsgeregelten Einspritzen ist darauf zu achten, dass der Spritzdruck nicht limitiert ist. Druckbegrenztes Spritzgießen sollte vermieden werden.

Der Umschaltzeitpunkt von geschwindigkeitsgeregeltem Einspritzen auf Nachdruck sollte so gewählt werden, dass das Teil zwischen 90-99% des Volumens geschwindigkeitsreguliert gefüllt wird. In der Regel wird der Druck am Umschaltzeitpunkt als Druck für den Nachdruck gewählt und sollte von Schuss zu Schuss möglichst konstant sein.

Bei erstmaliger Verwendung von Spritzgießwerkzeugen muss zur Ermittlung der Prozessparameter eine Füllstudie durchgeführt werden. Während dieser Füllstudie ist das Einspritzvolumen beginnend mit 10% Formfüllung in 10%-Schritten zu erhöhen und die Masse mit unterschiedlichen Einspritzgeschwindigkeiten in das Werkzeug zu spritzen, um Aufschluss über kritische Bereiche des Werkzeuges, Bindahtentstehung, Kaltverschiebungen etc. zu erhalten. Anhand dieser Formfüllstudie kann die für die Produktion geeignete Einspritzgeschwindigkeit ausgewählt werden.

Um Qualitätsschwankungen während des Anfahrens des Spritzgießprozesses zu vermeiden und um ein thermisches Gleichgewicht im Gesamtsystem Maschine - Werkzeug herzustellen, sind bei Beginn der Produktion und bei Änderung eines der Maschinenparameter grundsätzlich die Spritzgussteile der ersten Zyklen zu verwerfen. Wie viele Teile verworfen werden müssen, muss für jedes Werkzeug erarbeitet werden.

Der Formprozess wird anhand der hinterlegten Spritzparameter von der Maschine selbst überwacht und dokumentiert. Die Qualitätskontrolle der geformten Grünlinge erfolgt anhand eines teilespezifischen Prüfplans. Die vom System geforderten Kriterien (z.B. Gewicht und ausgewählte Maße) werden an einem SPC-Messplatz (Statistical Process Control) überprüft. Folgende Parameter sollten möglichst konstant sein:

- Dosierzeit
- Zylindertemperaturen
- Werkzeugtemperaturen
- Düsentemperatur
- Druck am Umschaltzeitpunkt
- Massepolster
- Zykluszeit
- Überwachung der Druckverlaufskurve während Einspritzen und Nachdruck

Bei Prozessunterbrechungen mit einer Dauer von mehr als 10-15 min ist die Temperatur in der Plastifiziereinheit abzusenken, um eine thermische Schädigung des Feedstocks zu vermeiden. Wird die Produktion anschließend wieder aufgenommen, sind die Anfahrteile so lange zu verwerfen, bis das gesamte System (Werkzeug, Spritzgießmaschine) ein thermisches Gleichgewicht erreicht hat. Die Anzahl der zu verwerfenden Anfahrteile sind für jedes Bauteil individuell zu ermitteln.

Es ist auf eine regelmäßige Reinigung und Schmierung der wichtigen Lauf- und Führungsflächen im Werkzeug zu achten. Das Werkzeug ist regelmäßig auf Verschleiß zu prüfen. Weiterhin muss das Werkzeug auf konstanten und ausreichenden Durchfluss von Kühlflüssigkeit überprüft werden. Nach Beendigung einer Bauteilserie oder in regelmäßigen Abständen ist das Werkzeug hinsichtlich des Verschleißes und dadurch verursachte Abweichungen in den Bauteiltoleranzen zu prüfen. Die Kavität des Werkzeuges muss dazu vermessen werden. Des Weiteren sollte eines der letzten gespritzten Grünteile aus dem Werkzeug in seinen Dimensionen mit einer Rückstellprobe aus dem Anfahrprozess des Werkzeuges verglichen werden, um verschleißbedingte Geometrie- und Maßabweichungen detektieren zu können. In festgelegten Abständen muss die Rückstromsperre auf Defekte und Abnutzungserscheinungen überprüft werden [4].

Wenn alle bisher genannten Aspekte während des Spritzgießens berücksichtigt worden sind, sollten die so gefertigten Grünteile zumindest stichprobenartig auf Gewichtsschwankungen untersucht werden. Das Grünteilgewicht gibt Aufschluss über eventuell aufgetretene Entmischungen des Feedstocks und daraus später resultierende Fehlstellen oder Maßabweichungen im Fertigteil. Eine Korrelation der von der Spritzgießmaschine aufgenommenen Sensorsignale (verschiedene Drucksensoren, Temperaturen) mit der Bauteilqualität gibt in der Serienfertigung eine hohe Prozesszuverlässigkeit. Ein weitergehender Ansatz ist die Qualitätskontrolle mit Hilfe von neuronalen Netzen [5].

Es wäre zusätzlich wünschenswert, zur Grünteilcharakterisierung auch zerstörungsfreie Prüfmethoden nutzen zu können. Bisher gibt es allerdings kein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das für Grünteile produktionsbegleitend eingesetzt werden kann. Dafür gibt es mehrere Gründe. Es ist zwar mit den heutigen Röntgenmikrofokusanlagen möglich, Defekte wie z.B. Entmischungen im Grünteil sichtbar zu machen, dennoch ist die Grenze der Auflösung von Spritzfehlern oder normaler Porosität im Grünteil unscharf. In **Bild 6** ist die Durchstrahlungsaufnahme eines fehlerfreien Zugstabes nach ISO 2740 im Vergleich zu einem mit Spritzfehler dargestellt. Die für MIM-Bauteile typische hohe Bauteilkomplexität erschwert zusätzlich eine zuverlässige Qualitätsüberwachung mit zerstörungsfreien Prüfmethoden. Außerdem ist der damit verbundene Aufwand (Zeit und Kosten) allerhöchstens in der Bauteilentwicklung zu rechtfertigen.





**Bild 6:** Röntgendurchstrahlung eines Zugstabes nach ISO 2740; fehlerloses Grünteil (oben), fehlerhaftes Grünteil (unten)

### Simulation

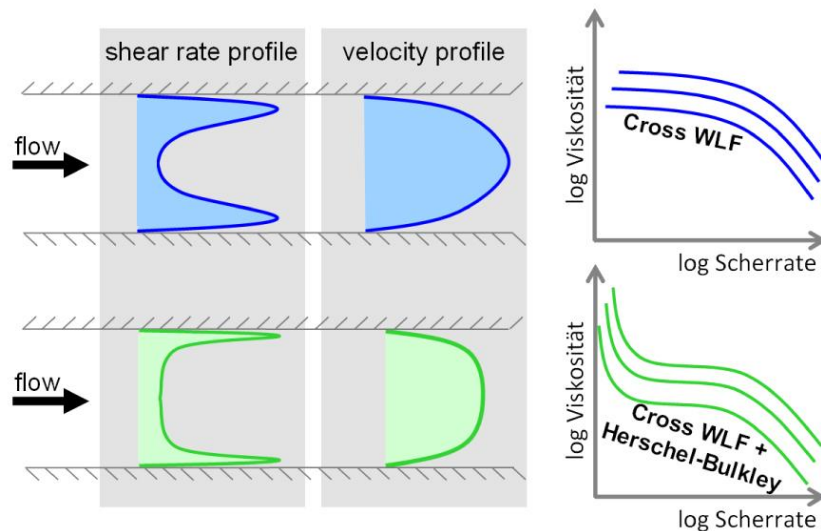
Da die Qualität eines MIM-Bauteils maßgeblich durch das Formfüllverhalten bestimmt wird, wird der Einsatz von 3D-Simulation ein immer wichtigeres Hilfsmittel. Formfüllsimulation komplizierter MIM-Bauteile dient der verbesserten Auslegung von Formwerkzeugen. Es sind bei jedem neuen Werkzeug typischerweise mehrere Iterationen notwendig, bis die Produktion mit den geforderten Bauteilspezifikationen stabil läuft. In der Praxis erarbeiten qualifizierte Prozessingenieure dazu Lösungen, basierend auf Erfahrungen, Messungen und DOE-Versuchen.

Konventionelle Simulationssoftware, wie sie für thermoplastische Materialien eingesetzt wird, kann nicht ohne weiteres für MIM angewendet werden. Der hohe Metallpulverfüllgrad im Feedstock beeinflusst die thermo-physikalischen Eigenschaften und die Rheologie entscheidend. Das bedeutet für eine zuverlässige Simulation des Formfüllvorgangs, dass einerseits für jeden Feedstock Daten wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und das pvt-Verhalten bekannt sein müssen und andererseits das für die Simulation verwendete Modell auf das spezielle rheologische Verhalten von Feedstock angepasst sein muss.

Durch das Sammeln von Daten über die Formfülleigenschaften und die Temperaturverteilung im Werkzeug kann eine optimale Einspritzposition und geeignete Werkzeugtrennung simuliert werden, bevor das Werkzeug tatsächlich gefertigt wird. Mit Hilfe von moderner Simulationssoftware können Produktionsprobleme und Schwächen in der Werkzeugkonstruktion aufgedeckt werden, bevor sie entstehen. Dies gilt nicht nur für die Artikel- und Werkzeugkonstruktion, auch bei der Abmusterung und in der Produktion können eventuelle Probleme und ihre Ursachen effizient ermittelt werden. Eine gute Spritzgieß-Simulationssoftware betrachtet das gesamte Spritzgießwerkzeug mit allen Komponenten und berücksichtigt alle Prozessschritte und -zeiten. Dies ermöglicht die

Analyse des Werkzeugverhaltens über mehrere Spritzgießzyklen hinweg und auch den Einfluss von Zyklusunterbrechungen auf Ausschuss, Qualität, Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz.

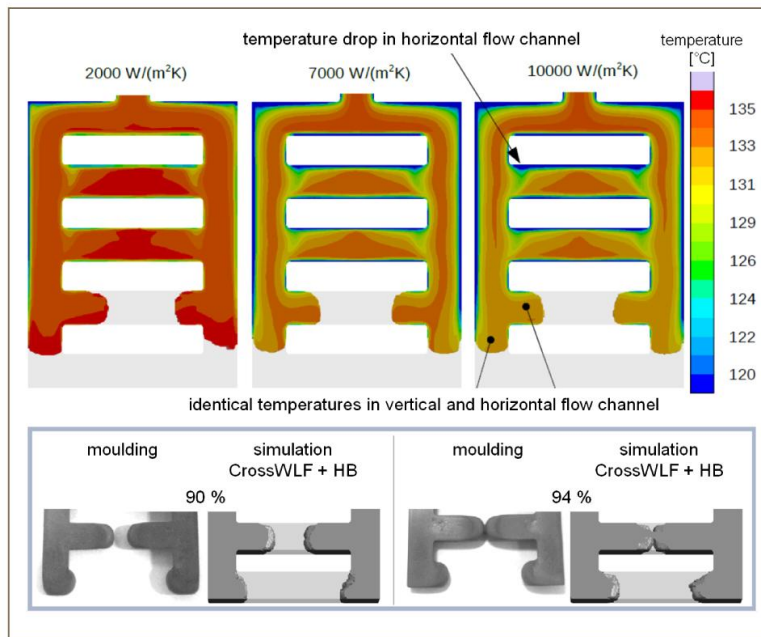
**Bild 7** erklärt schematisch die Effekte, die durch unterschiedliche rheologische Modelle in den Füllprofilen entstehen. Es wird das Cross-WLF-Modell, wie es für rein thermoplastische Kunststoffe geeignet ist, mit der für MIM angepassten Erweiterung des Modells nach Herschel-Bulkley verglichen. Es zeigt sich, dass über den gesamten Scherratenbereich das typische Verhalten von MIM-Feedstock wiedergegeben wird [6, 7]. Der starke Anstieg der Viskosität bei niedrigen Scherraten ist besonders charakteristisch für das Verhalten von Feedstocks, die sich in diesem Bereich eher wie ein Festkörper verhalten und nicht wie eine Polymerschmelze.



**Bild 7:** Unterschiedliche Fließprofile für das Cross-WLF-Modell und das Cross-WLF + Herschel-Bulkley-Modell [7]

Experimentelle Untersuchungen verifizieren die Qualität der Formfüllsimulation mit dem erweiterten Modell; sowohl die Füllphase als auch die Erstarrung des Feedstocks konnten deutlich verbessert werden.

**Bild 8** zeigt eine Form, die zum Vergleich der experimentellen Formfüllstudien mit den Simulationsergebnissen herangezogen wird. Diese Form gibt durch die zahlreichen erzeugten Bindenähte auch Aussagen über die Anfälligkeit eines Feedstocks, kalte Bindenähte auszubilden, die dann nach dem Sintern als Risse zu Tage treten können.



**Bild 8:** Validierung des Viskositätsmodells mit dem Leiterwerkzeug [7]

### Entbindern und Sintern

Der wichtigste Qualitätsparameter für den Prozessschritt Entbindern ist der Gewichtsverlust der Bauteile. Der Gewichtsverlust kann bei zweistufigen Entbindungsprozessen durch eine Wägung nach dem ersten Schritt, z.B. dem Lösungsmittelentbindern, bestimmt werden. Für die Bauteileigenschaften ist es von großer Bedeutung, den Binder rückstandsfrei zu entfernen. Es entstehen beim thermischen Zersetzen von Binderbestandteilen gasförmige Produkte, welche die eingestellte Ofenatmosphäre zum Sintern verändern und zu unerwünschten Reaktionen während des Sinterns führen können. Dieser Einfluss kann mit Hilfe eines Massenspektrometers erfasst und daraufhin die Prozesse angepasst werden [8].

Das Sintern erfolgt unter ständiger Überwachung der Ofenparameter. Stellgrößen wie Temperatur, Druck, Gasmenge und Taktzeit werden online überwacht und in der Ofensteuerung dokumentiert. Die Qualitätskontrolle erfolgt am SPC-Messplatz anhand des Prüfplans für die Sinterteile. Die typischen Prüfkriterien sind Dichte, Härte, Festigkeit, Maße und optische Merkmale.

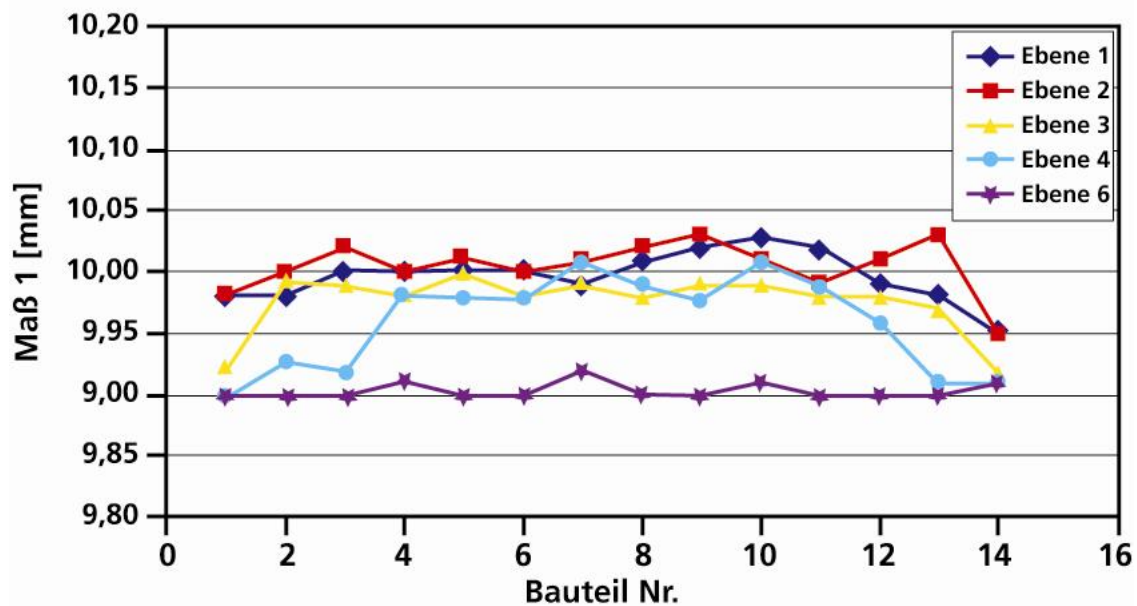
Die Einhaltung der Temperaturmessgenauigkeit ist von entscheidender Bedeutung für die Qualität der Sinterteile und wird in verschiedenen Richtlinien geregelt. Hierbei spielen Faktoren wie Anwendungsfall, Prozesse und Ofentypen eine Rolle. Ziel ist es, eine Rückführung auf anerkannte Vergleichsgrößen sicherzustellen [9].

Dazu wird auf verschiedene internationale Normen zurückgegriffen. Die allgemeine deutsche Norm zur Temperaturverteilung in Wärmebehandlungsöfen ist die DIN 17052-1. Besondere Anforderungen des nordamerikanischen Automobilverbandes (AIAG) werden definiert in den CQI-Standards. CQI-9 ist der für die Bewertung von Wärmebehandlungssystemen relevante Standard. Besondere Anforderungen der Luftfahrtindustrie werden in AMS2750 (Aerospace Material Specification) definiert. Methoden zur Ermittlung der Systemgenauigkeit durch u.a. Vergleichsmessung an der Mess-, Registrier- und Regelstrecke im laufenden Betrieb bei der Anwendungstemperatur sind sowohl bei Hubbalkenöfen als auch Stoßöfen ohne Einschränkung möglich. Methoden zur direkten Ermittlung der Temperaturverteilung durch Einbringung von kalibrierten Sensoren in den Ofenraum unter Produktionsbedingungen sind hingegen wegen der dazu nötigen Einbringung der Referenzelemente durch das Doppeltürensysteem der Ein- und Auslaufschleuse nicht möglich.

Da sich die Einbringung der Thermoelemente bei geschlossenen Anlagen schwierig gestaltet, können alternative Methoden zur Ermittlung der Temperaturhomogenität verwendet werden. So ist z.B. das Einbringen von Musterteilen, welche sensibel auf Temperaturänderungen reagieren, z.B. Maße ändern, möglich. Hierzu finden häufig PTCR-Ringe Verwendung, welche Aufschluss über die absorbierte Wärmemenge geben (Integralbildung über der Durchlauflänge).

Trotz der teilweise schwierigen Umstände in den Öfen kann auch bei kontinuierlichen und Batch-Anlagen die Forderung nach einem Qualitätsstandard gemäß DIN 17052-1, CQI-9 oder AMS2750 umgesetzt werden.

In **Bild 9** sind Messungen eines Bauteilmaßes quer durch die Charge eines Batch-Ofens über alle sechs Ebenen dargestellt. Es sind erhebliche Maßabweichungen zu erkennen, die auf die Temperaturverteilung im Ofen zurückzuführen sind. So sind beispielsweise Bauteile in der Nähe der Heizelemente stärker geschrumpft.



**Bild 9:** Systematische Vermessungen gesinterter Bauteile zur Erfassung der Toleranzbreite. Abhängigkeit von der Ofenposition:

- horizontaler Einfluss durch Heizleiter (Bauteil Nr.)
- vertikaler Einfluss (Sinterebene)

### Nachbehandlung HIP

Wenn im Anschluss an das Sintern zusätzliche Bearbeitungsschritte erfolgen, werden diese ebenfalls im Prüfplan hinterlegt. Auch extern durchgeführte Bearbeitungsprozesse können anhand von Messprotokollen des Dienstleisters im Qualitätsmanagementsystem des Bauteilherstellers dokumentiert werden.

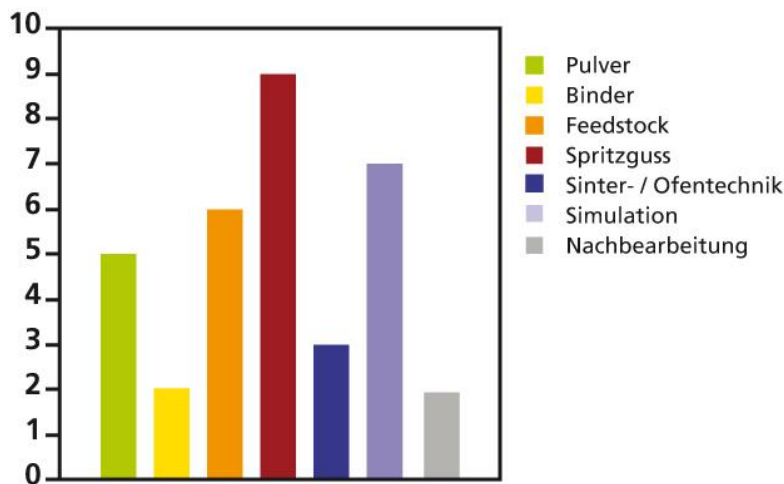
Aufgrund der Feinheit der verwendeten Metallpulver erreichen die Teile nach dem Sintern Dichten oberhalb von 95% der theoretischen Dichte. Sie können daher, ohne gekapselt zu werden, in einem HIP-Prozess weiter verdichtet werden. Kritisch zu betrachten sind Teile-Verfärbungen, da sie Hinweise auf mögliche Korngrenzencarbide oder -oxide darstellen. Verfärbungen sind durch Sichtkontrolle leicht feststellbar. In solchen Fällen müssen die betroffenen Teile aussortiert und gegebenenfalls mit dem Einverständnis des Kunden noch einmal behandelt werden. Die Erfahrung lehrt, dass mit Unterstützung durch Getter-Schrott das Gebrauchsgas gereinigt und die Verfärbungen rückgängig gemacht werden können. Dasselbe bewirken auch Frischgaszyklen. Daher muss das zum HIPpen benutzte Argon-Gas rein genug sein [10].

## Zusammenfassung und Ausblick

Das Prozessverständnis für die komplexen Zusammenhänge zwischen Bauteilfehlern und Fertigungsparametern ist in den letzten Jahren deutlich gewachsen. Betrachtet man die aktuelle Situation der MIM-Fertigung ist sicher festzuhalten, dass durch die eingeführten Qualitätssysteme in der Großserie teilweise mit weniger als 2% Ausschussrate gearbeitet wird. Dies ist allerdings immer bauteilspezifisch zu betrachten und gilt nur für eingeführte Standardwerkstoffe und -prozesse.

In **Bild 10** ist eine subjektive Einschätzung der Bedeutung der einzelnen MIM-Prozessschritte und der unterstützenden Technologien für das Erreichen einer Nullfehlerproduktion zusammengestellt.

Durch Maßschneidern der Pulverherstellung auf die speziellen Anforderungen des MIM ist eine weitere Verbesserung der Bauteilqualität zu erwarten. Insbesondere sind hier Unterschiede zwischen den Pulverbatches zu minimieren, aber auch speziell designte Partikelmorphologie und deren Größenverteilung spielen eine Rolle für das Erreichen enger Toleranzen und maßgeschneiderter Oberflächenrauigkeit.



**Bild 10:** Einschätzungen des Einflusses der Prozessschritte auf die Bauteilqualität auf einer Skala von 1 bis 10

Der Einfluss des organischen Binders als temporärer Prozesshilfsstoff ist weitgehend verstanden und hat genau wie die zugehörige Technologie zum Entbindern kein großes Potenzial für eine weitere Verbesserung der Bauteilqualität.

Beim Feedstock ist insbesondere die Forderung nach verbesserter Batch-zu-Batch Konsistenz ein wichtiger Schritt für das Einhalten enger Fertigungstoleranzen.

Den größten Einfluss auf die Bauteilqualität hat das Spritzgießen. Die Qualität des fertigen MIM-Bauteils wird stark durch die Formfüllung des Grünteils beeinflusst. Hierzu gibt es zahlreiche Parameter, um die Grünteilqualität zu optimieren. Ein Hilfsmittel dazu ist auch die Simulation der Formfüllung, die zunehmend zuverlässiger vorhersagen kann, wo Problemstellen im Grünteil zu erwarten sind. Weitere Verbesserungen der Simulation sind durch eine verfeinerte Datenbasis (z.B. pvt-Daten für verschiedene Polymermischungen) und die Vorhersage von Pulver-Binder-Entmischung zu erwarten. Es ist aber noch ein weiter Weg, bis Bauteilverzug zuverlässig vorhergesagt werden kann.

Die Ofentechnik behält einen klaren Einfluss auf die Toleranzen. Durch eine Weiterentwicklung der Mess- und Sensortechnik werden Temperatur- und Atmosphärenhomogenität kontinuierlich weiter verbessert. Auch durch Nachbehandlung wie z.B. HIP kann eine weitere Steigerung der Bauteileigenschaften erreicht werden.

MIM ist eine reife Technologie zur Großserienfertigung komplexer Bauteile, die heute bereits mit geringen Ausschussraten anspruchsvolle Kundenwünsche erfüllen kann. Das Prozessverständnis hat bereits ein hohes Niveau erreicht. Allerdings gibt es auf dem Weg zur Nullfehlerproduktion noch Verbesserungspotenzial in allen Fertigungsschritten; dies gilt insbesondere beim gezielten Steuern der komplexen Zusammenhänge in der Gesamtprozesskette.

### **Danksagung**

Der MIM-Expertenkreis hat sich die Aufgabe gestellt, die MIM-Technologie gemeinsam weiterzuentwickeln und zur deren Verbreitung beizutragen. Dieser Artikel basiert auf der Mitarbeit und auf mir zur Verfügung gestellten Informationen von Mitgliedern aus dem MIM-Expertenkreis. Mein besonderer Dank gilt den folgenden Firmen:

- Arburg GmbH & Co. KG
- Bodycote HIP GmbH
- Cremer Thermoprozessanlagen GmbH
- GKN Sinter Metals GmbH
- Inmatec GmbH
- Schunk Sintermetalltechnik GmbH
- SIGMA Engineering GmbH

## Literatur

- [1] *German, R.*: Understanding defects in Powder Injection Molding: Causes and Corrective Actions, PIM International Magazine, Vol. 6 Nr. 1, Januar 2012, 33-44
- [2] *Schwarz, J., Lenk*, GKN Sinter Metals: persönliche Mitteilung
- [3] *Fridman, G.*: Effect of some technological parameters on the properties of injection moulded and sintered powder materials, Proceedings EuroPM 2001, Vol. 3(2001) 141-146
- [4] *Walcher, H., Maetzig, M.*, Arburg GmbH & Co. KG: persönliche Mitteilung
- [5] *Schwenzel, J., Petzoldt, F.*: Process Stability and Quality Surveillance in the Metal Injection Moulding Process-Towards Zero Rejection Based on an Artificial Neuronal Network, Proceedings EuroPM 2009, Vol. 2 (2009) 129 – 134
- [6] *Thornagel, M., Florez, L.*: Successful cycle optimization and quality improvements based on process simulation results, Proceedings EuroPM 2012, Basel
- [7] *Thornagel, M.*: Injection moulding simulation: New developments offer rewards for the PIM industry, PIM International Magazine, Vol. 6 Nr. 1, Januar 2012, 65-68
- [8] *Hartwig, T., Mueller Schroeder, R.*: Analyse des Entbinderns und Sinterns von MIM-Teilen mittels Massenspektroskopie, H. Kolaska (Hrsg.) Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Bd. 27 (2011), 273-284
- [9] *Cremer, I.*, Cremer Thermoprozessanlagen GmbH: persönliche Mitteilung
- [10] *Graf, W., Porst, O., Volker, K.-U.*: Qualitätssicherung beim Heiß-Isostatischen Pressen, Vandewiele, B. (Hrsg.); Tagungsband „Qualität in der Wärmebehandlung“, (2005)