

**Gussformwerkstoffe aus quasiduktiler Faserkeramik (C/SiC)
für den Hochtemperaturdruckguss**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem Az:
35856/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Breuckmann GmbH & Co.KG

und

ECM - Engineered Ceramic Materials GmbH

März 2023

A Inhaltsverzeichnis

A Inhaltsverzeichnis	I
B Abbildungsverzeichnis	II
C Tabellenverzeichnis.....	V
Zusammenfassung	1
1. Einleitung.....	2
2. Versuchsdurchführungen und Auswertungen	4
2.1 Anforderungen an die Faserkeramik	4
2.2 Auswahl von prototypischen Bauteilen und Gussmaterialien.....	4
2.3 Entwicklung des konstruktiven Formenbaus	6
2.4 Entwicklung und Anpassungen des keramischen Materials	8
2.5 Entwicklung der keramischen Formeinsätze.....	22
2.6 Einflussfaktoren zur Bewertung der Mess- und Testergebnisse	24
2.7 Integration der keramischen Formeinsätze	24
2.8 Entwicklung einer Bearbeitungstechnik.....	29
2.9 Entwicklung eines Druckgussprozesses.....	32
2.10 Untersuchung von geeigneten Formschichten	39
2.11 Durchführung von Tests & Validierung der Formstandzeit.....	41
3. Fazit.....	45
Literaturverzeichnis	49
Anhang.....	A1

B Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich des Energiebedarfs von Feinguss und Druckguss	3
Abbildung 2: Druckstück eines Gussbaums	5
Abbildung 3: Prototypeneinsätze für den vertikalen Druckguss	6
Abbildung 4: Druckstückeinsatz und Halter	6
Abbildung 5: Druckstückeinsatz und Druckstückeinsatz mit Halter	7
Abbildung 6: Simulation des Formfüllvorgangs	7
Abbildung 7: Simulation der Abkühlung nach dem Formfüllvorgang	8
Abbildung 8: Faserarten v.l.n.r.: C-Langfaser, C-Kurzfaser geschnitten, C-gemahlene Fasern, C- Gewebe	9
Abbildung 9: Pressen der Mischungen zu CFK-Blöcken 180x180x75mm, in thermisch gesteuerter Presse	10
Abbildung 10: v.l.n.r. C/C-Block Materialproben, C/C Formteil, Formteil mit Si infiltriert bzw. sandgestrahlt	10
Abbildung 11: Materialentwicklungsprozess für die duktile Faserkeramik.....	11
Abbildung 12: 4-Pkt.Biegetest, Zwick Prüfmaschine, Bruchflächen Kurzfaser- und hybrides Material.....	12
Abbildung 13: Testprozedur Thermo-Schocktest, Delta T=900° C (Aufheizen und Abkühlen)	13
Abbildung 14: Analyse Oberflächenverhalten und Mikrostruktur von den Faserkeramik Materialien.....	14
Abbildung 15: hybride C/C Materialproben, infiltriert mit SIC-Beschichtung (rechts)	15
Abbildung 16: Materialproben - Testprogramm	16
Abbildung 17: Optimierung im Druckgussverfahren.....	16
Abbildung 18: Screenshot, Ausschnitt Gussversuche aus der Bewertungsmatrix	18

Abbildung 19: FE-Analyse zur Belastung eines Druckstückes aus dem Material HB-Cesic	22
Abbildung 20: Dip-Probe anfangs der Versuchsreihe	25
Abbildung 21: Dokumentation einer Dip-Probe im späteren Verlauf.....	26
Abbildung 22: Prüfstandversuch Schwerkraftguss	26
Abbildung 23: Dokumentation einer Schwerkraftguss-Probe am Anfang der Versuchsreihe	27
Abbildung 24: Dokumentation einer Schwerkraftguss-Probe im späteren Verlauf der Versuchsreihe	28
Abbildung 25: Analyse FG24-DR4-01 nach Test sandgestrahlt, Mikroskop Aufnahme 60x vergrößert	28
Abbildung 26: Ergebnis beim Drahterodieren und Fräsen.....	31
Abbildung 27: Druckstück aus Faserkeramik	32
Abbildung 28: eingebauter faserkeramischer Halter und Druckstückeinsatz	32
Abbildung 29: Beschädigungsarten der Einsätze	33
Abbildung 30: Druckstück-Einsatz FG28H, hybrides Material, Druckstück aus FG27.1 Material.....	34
Abbildung 31: Druckstück-Einsatz FG33, hier eingeklebt in den Metallhalter	34
Abbildung 32: Einsatz mit Hinterschnittpassung	35
Abbildung 33: Druckstückeinsatz eingeklemmt (mit einem Spiel von 2/10mm Kontur, 1.2mm rückseitig).....	35
Abbildung 34: Mikroskopie 40x, Abplatzungen Mittellinie /Kontur keine Mikrorisse. 36	
Abbildung 35: Messung der Rauigkeit im Gusskanal, Mikroskopie 40x Rückseite rissfrei	36
Abbildung 36: Beschädigungen trotz Verklebung und Hinterschnittpassung.....	37

Abbildung 37: Vergleich der Abgüsse vor und nach Beschädigung.....	37
Abbildung 38: Vergleich der Formfüllzeiten bei kleinen und großen Bauteilen	38
Abbildung 39: Gießsimulation großer Bauteile.....	38
Abbildung 40: Gießsimulation kleiner Bauteile	39
Abbildung 41: Prüfstandsversuch für Bestimmung einer geeigneten Formschlichte	40
Abbildung 42: Bewertung der Formschichten	40
Abbildung 43: Vergleich von Variationen der Bornitrid-Schlichte	41
Abbildung 44: Druckgusswerkzeug mit Einsätzen	42
Abbildung 45: Prototyp-Gussform AS/DS nach dem Test mit Auswerfer	43
Abbildung 46: FG27, Mikroskopie 100x Oberfläche Gussform, leichtes Ablösen, keine Anhaftung	43
Abbildung 47: FG27, Mikroskopie 100x Oberfläche Gussform, leichtes Ablösen, keine Anhaftung	44
Abbildung 48: FG27.2, FG33, FG 35.2 Proben mit Abformungsschräge nach Gusstest	44

C Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Zielparameter	3
Tabelle 2: Übersicht der Prozessparameter	4
Tabelle 3: Anzahl der produzierten Proben aus 52 C/SiC Material-Rohblöcken.....	11
Tabelle 4: Anzahl der produzierten Formteile aus 52 C/SiC Material-Rohblöcken	11
Tabelle 5: Wärmeausdehnungskoeffizienten Keramik für eine Auswahl von FG- Materialien.....	21
Tabelle 6: Nutzwertanalyse der Bearbeitungstechniken für Außenkonturen	30
Tabelle 7: Nutzwertanalyse der Bearbeitungstechniken für Innenkonturen	31

Zusammenfassung

Das Projekt „DBU Faserkeramik“ durch die Kooperation der Firma Breuckmann GmbH & Co.KG und der ECM - Engineered Ceramic Materials GmbH dient zur Validierung quasiduktiler Faserkeramik als Werkzeugmaterial für den Druckguss, um hohe Formstandzeiten zu erreichen und um das umweltschädliche Feingießverfahren, welches vor allem in asiatischen Ländern Anwendung findet, zu ersetzen. Dies würde sich positiv auf die Nachhaltigkeit der kompletten Prozesskette zur Herstellung von Gussteilen auswirken.

Durch Absprache mit ECM wurden zunächst die faserkeramischen Bauteile für den Druckguss festgelegt und konstruiert. Dabei wurden unterschiedliche Probearten entwickelt. Neben den Dip-Proben, die größtenteils zur Materialentwicklung getestet worden sind, wurden in den nächsten Schritten unterschiedliche Druckstückeinsätze im horizontalen und Prototypeinsätze im vertikalen Druckguss eingesetzt, um die Festigkeit hinsichtlich der thermischen und mechanischen Belastungen zu überprüfen. Neben den Versuchen im Druckguss wurden über das Projektziel hinausgehend einige Proben für den Kokillenguss entwickelt und ausgewertet.

Trotz der hervorragenden Materialentwicklung seitens ECM, wodurch während der Laufzeit des Projektes die Standzeiten der Faserkeramik vervielfältigt werden konnte, und der grundlegenden Veränderung des Druckgussprozesses für die Nutzung faserkeramischen Werkzeuge seitens Breuckmann, stellte sich die komplexe Integration und Anpassung als große Herausforderung dar.

Mehrere Faktoren erwiesen sich als herausfordernd bis unmöglich, wie beispielsweise die Parameteroptimierung des Druckgussprozesses hinsichtlich schlagender Belastungen oder auch die anfangs zu hohen thermischen Belastungen, die auf die Faserkeramik wirkten und zu einem frühzeitigen Materialversagen resultierten.

1. Einleitung

Hohe Formstandzeiten stellen im Kupferdruckguss eine große Herausforderung dar. Die Ursache dafür ist die sogenannte thermische Ermüdung des Werkzeugs aufgrund der radikal wechselnden thermischen Spannungen, die zu einem hohen Formverschleiß führen.¹ Um der Kupferdruckgusstechnologie vor allem gegenüber Edelstahlfeingießereien Vorteile zu verschaffen, muss die Formstandzeit drastisch erhöht werden.

Das Druckgussverfahren bietet gegenüber dem Feinguss einige Vorteile. Einerseits benötigt dieses im Gegensatz zum Feinguss keine umweltbelastende Einwegformen aus Wachs, die aufgrund eingelagerter Feuerfestpartikel nicht recycelbar sind.² Hinzufügend kommt noch der Einsatz von umwelt- und brandgefährdenden Bindemitteln zur Herstellung der Keramikformen.³ Aufgrund der Komplexität des Feingussverfahrens und der vielen Bearbeitungsschritte kann die komplette Produktion nicht an einem Standort stattfinden, wodurch Transportwege entstehen, die ebenfalls zu einer erhöhten Energiebilanz resultieren. Neben diesen Punkten ist auch der Automatisierungsgrad des Feingussverfahrens niedrig. Die meisten Schritte müssen manuell durchgeführt werden, was zu einer höheren Ausschussrate und damit zu einem höheren Ressourceneinsatz resultiert.

Demgegenüber steht der Druckgussprozess, welcher einen hohen Automatisierungsgrad und somit eine erhöhte Produktivität bietet.⁴ Weiterhin ist der Druckguss auch hinsichtlich der Nachhaltigkeit aufgrund der Recyclingmöglichkeiten und der Absenz von Abfallprodukten vielversprechend. Durch solche und weitere Faktoren kann ein Vergleich der Energiebilanzen wie in Abbildung 1 dargestellt werden. Mithilfe dieser wird deutlich, dass für das Feingussverfahren deutlich mehr Energie verbraucht wird als für den Druckguss. Ein Wechsel von Feinguss zu Druckguss würde daher auch eine Verbesserung der Nachhaltigkeit bedeuten.

¹ Vgl. Sepanta Naimi und Seyedeh Maryam Hosseini, S.1

² Vgl. Ram Prasad, S.25

³ Vgl. Ram Prasad, S.25

⁴ Vgl. L.X. Kong et al., S.629

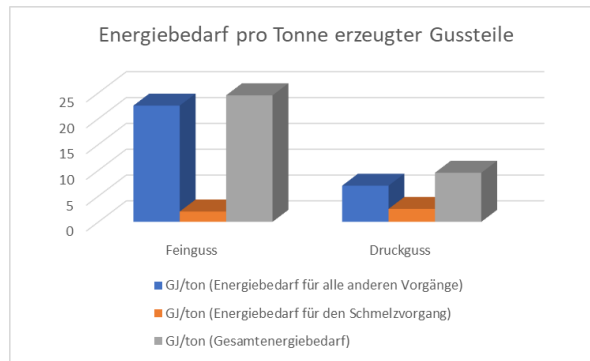


Abbildung 1: Vergleich des Energiebedarfs von Feinguss und Druckguss⁵

Das Ziel im Rahmen des Projekts „DBU Faserkeramik“ war die Erhöhung der Formstandzeiten der Druckgusswerkzeuge durch die Zusammenarbeit der Breuckmann GmbH & Co. KG mit der ECM Engineered Ceramic Materials GmbH. Die Lösung war die Weiterentwicklung von quasiduktiler Faserkeramik als Material für Gießwerkzeuge.

In den Anwendungsgebieten, in welcher die Faserkeramik eingesetzt werden soll, sind derzeit je nach Gießmaterial Formstandzeiten von maximal 10.000 Gießvorgänge mit hochlegierten Warmarbeitsstählen erreichbar. Die Tabelle 1 bildet die Ziele ab. An dieser erkennt man, dass eine deutliche Steigerung erwünscht ist, um das Marktvolumen des Druckgussprozesses hinsichtlich solcher Gießmaterialien zu erhöhen und somit das Edelstahlfeingussverfahren unabhängig von Währungsschwankungen und Materialpreisen ablösen zu können.

Tabelle 1: Übersicht der Zielparameter

Gussmaterial	Gießtemperatur	Formstandzeit (Ziel)	Verschleißkosten pro Gießvorgang (Ziel) [€]
Messing	~ 950°C	65.000	0,54
Siliziumtombak	~ 1000°C	60.000	0,58
Kupfer	~ 1150°C	25.000	1,40

⁵ Vgl. H. Mehrabi et al, S.2; Eigene Darstellung

2. Versuchsdurchführungen und Auswertungen

In diesem Kapitel werden nun die Versuchsdurchführungen und Auswertung anhand der Arbeitspakete des Projektes vorgestellt und die Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung ausgewertet.

2.1 Anforderungen an die Faserkeramik

Der Druckguss stellt aufgrund seiner thermischen und mechanischen Prozessgrößen hohe Anforderungen an das Werkzeug. Neben den hohen Gießtemperaturen bis zu 1150°C Schmelztemperatur bei Kupfer und entsprechenden Temperaturwechselbeanspruchungen bei Werkzeugtemperaturen von maximal 300°C werden Drücke von bis zu 120 MPa erreicht. Dies stellt somit auch höchste Anforderungen an die Faserkeramik, da diese die Belastungen ohne frühzeitiges Materialversagen bewältigen und die in der Tabelle 1 genannten Formstandzeiten übertreffen müssen. Beim Kokillenguss hingegen entfallen die hohen mechanischen Belastungen. In Tabelle 2 ist eine Übersicht der Prozessparameter abgebildet, welche weitere Ansprüche an die Faserkeramik stellen.

Tabelle 2: Übersicht der Prozessparameter

Prozessparameter	Druckguss	Kokillenguss
Temperatur der Schmelze	1000°C	1000°C
Temperatur der Form	250-270°C	150°C
Gießdruck	120 MPa	-
Geschwindigkeit des Gießkolbens	2-3 m/s	-
Zykluszeit eines Gießvorgangs	30s	60s

2.2 Auswahl von prototypischen Bauteilen und Gussmaterialien

Zuallererst ist die Bestimmung der prototypischen Bauteile und die Gussmaterialien notwendig. Da die im Kapitel 2.1 dargestellten Anforderungen eine hohe thermische Beständigkeit erfordern, wurde als Bauteil das Druckstück im horizontalen Druckguss am unteren Ende des Gussbaumes ausgewählt (siehe Abbildung 2). Dieser hat den Vorteil, dass man die Beständigkeit der Faserkeramik überprüfen kann, ohne die Qualität der Gussteile am Gussbaum zu beeinträchtigen.

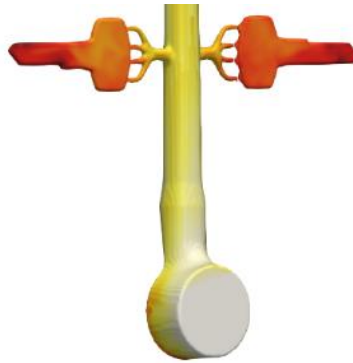


Abbildung 2: Druckstück eines Gussbaums

Die Breuckmann GmbH & Co.KG verwendet in ihrer Produktion hauptsächlich Messing, insbesondere Siliziumtombak, der im Druckguss gegossen wird. Um praxisnahe Tests durchzuführen, wurde auch bei den Versuchen mit dieser Legierung gearbeitet, wobei die Gießtemperatur bei 1000°C liegt. Für die Kokillenguss-Versuche wurde ebenfalls Siliziumtombak verwendet.

Zudem wurde ein zweites prototypisches Bauteil konstruiert. Diese sind die Formeinsätze im vertikalen Druckguss. Im Gegensatz zu den Druckstücken haben sie Konturen der Gussteile, hier Zugproben und vereinfachte Bauteilgeometrien, direkten Einfluss auf die Bauteilqualität. Mithilfe dieser Prototypen kann dann die Beeinflussung der Faserkeramik auf die Qualität der Gussteile bewertet werden. Ein weiterer wichtiger Faktor ist das Auswerfen der Gussteile aus der Maschine. Eine optimale Entformungsschräge erleichtert das Auswerfen des Gussteils. Um den optimalen Entformungswinkel für die Faserkeramik zu bestimmen, wurden Gussteile mit verschiedenen Entformungswinkeln (1°, 2° und 5°) getestet. Um die Faserkeramik aufgrund von Reibungseinflüssen weniger zu belasten, wurden jedoch auch zwei weitere Szenarien untersucht. Bei einem Winkel von 5° tritt jedoch ein deutlicher Extremfall auf, der in der Produktion normalerweise nicht verwendet werden kann, da die Maßhaltigkeit des Kundenbauteils dann nichtmehr gewährleistet ist. Eine technische Zeichnung mit den Einsätzen für die Ober- und Unterform ist der Abbildung 3 zu entnehmen.

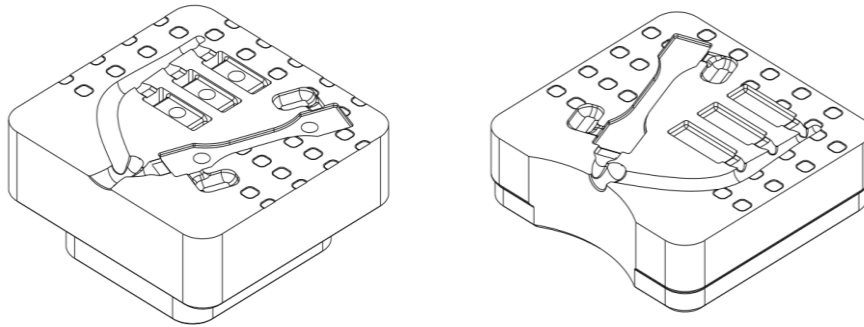


Abbildung 3: Prototypeneinsätze für den vertikalen Druckguss (links: Oberform, rechts: Unterform)

2.3 Entwicklung des konstruktiven Formenbaus

Faserkeramik wird nur an den Stellen eingesetzt, an denen sie in Kontakt mit der Schmelze steht. Die restlichen Komponenten bestehen aus einem Werkzeugstahl, um zusätzliche Spannungen auf die Faserkeramik zu vermeiden und um die kostenintensive Herstellung großer Bauteile aus Faserkeramik zu vermeiden. Daher wurden verschiedene Halter aus Werkzeugstahl entwickelt, die an das Gießwerkzeug montiert werden und die verschiedenen Druckstückeinsätze aus Faserkeramik werden eingefasst. Abbildung 4 zeigt die prototypische Baugruppe aus Einsatz und Halter als technische Zeichnung.

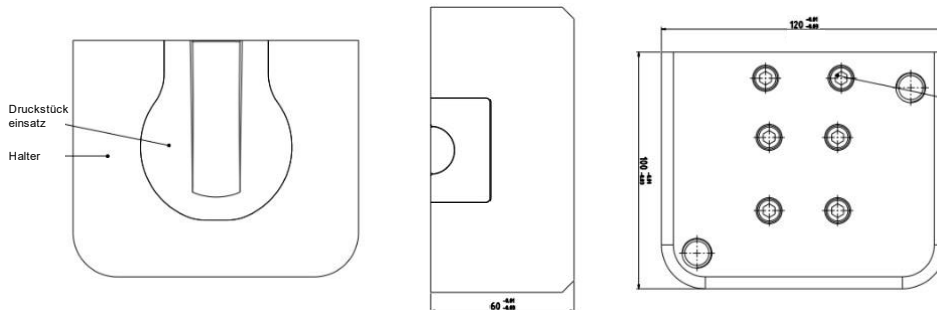


Abbildung 4: Druckstückeinsatz und Halter

In Abbildung 5 erkennt man die Hinteransicht des Druckstückeinsatzes und den gefertigten Halter mit dem verschraubten Druckstückeinsatz.



Abbildung 5: Druckstückeinsatz (links) und Druckstückeinsatz mit Halter (rechts)

Die Bearbeitung der Einsätze und weiterer Materialproben sollte mithilfe von Fräsen, Drahterodieren und Senkerodieren erfolgen. Eine detaillierte Dokumentation sowie die Auswertung von Bearbeitungsversuchen werden in einem nachfolgenden Kapitel ausführlich erläutert.

Um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen und Spannungen zu reduzieren, wurden an irrelevanten Bereichen des Bauteils Formeinsätze aus Werkzeugstahl konstruiert. Mithilfe vorheriger Gießsimulationen konnte man eine Prognose über die Verteilung der thermischen Belastung und die thermische Ausdehnung einzelner Komponenten erstellen. Abbildung 6 zeigt eine Simulation des Formfüllvorgangs, auch Schuss genannt, durch das Gießlaufsystem, in welchen die Wandtemperaturen des Werkzeuges als auch die des Druckstückeinsatzes verdeutlicht werden. Diese Simulationen weisen darauf hin, dass besonders am unteren Bereich des Druckstücks die höchsten thermischen Belastungen von bis zu 400°C auftreten, da es die erste Kontaktfläche der Schmelze ist. Im oberen Bereich des Druckstücks liegen die Temperaturen zwischen $300 - 350^{\circ}\text{C}$.

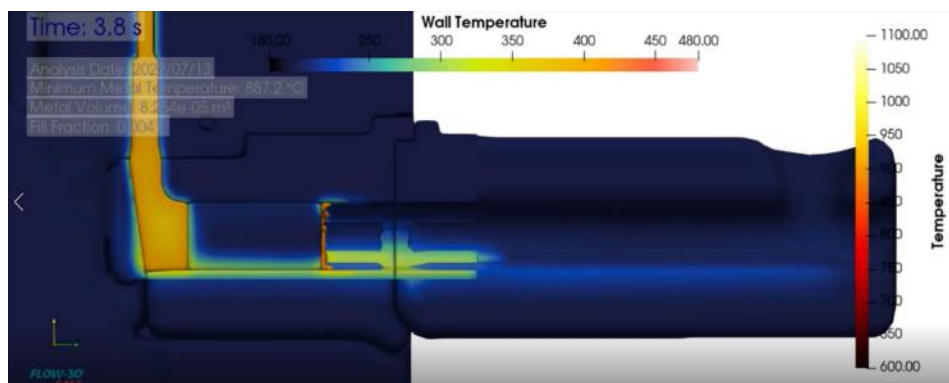


Abbildung 6: Simulation des Formfüllvorgangs

Nach ungefähr zehn Sekunden Abkühlung (siehe Abbildung 7) liegen die Temperaturen in den meisten Bereichen zwischen 180 – 250°C. Am thermisch höchsten belasteten Bereich liegt die Temperatur bei ca. 300°C. Laut den Simulationen stellt der Temperaturverlauf als auch die thermische Ausdehnung der Komponenten keine Problematiken für die Faserkeramik dar. Eine wärmeausdehnungsbedingte Kompensation zur Vermeidung von zusätzlichen Spannungen, wurde bei der Demonstratorbauteilfertigung entsprechend berücksichtigt.

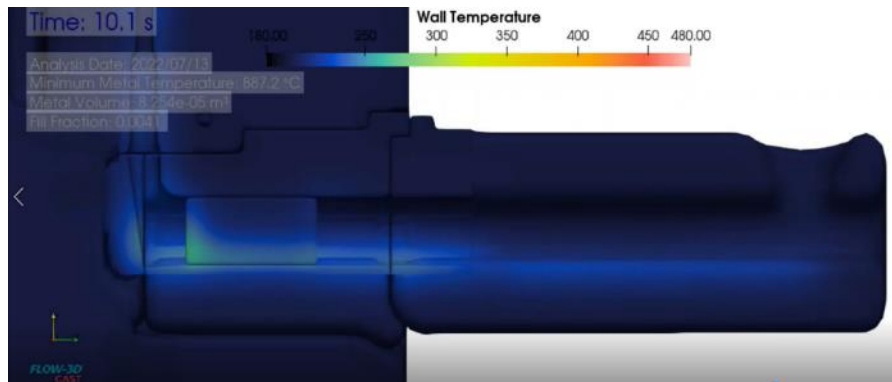


Abbildung 7: Simulation der Abkühlung nach dem Formfüllvorgang

2.4 Entwicklung und Anpassungen des keramischen Materials

Basierend auf den Erfahrungen auf dem Gebiet der Herstellung von C/SIC Keramik startete diese Materialentwicklung mit einem „Trade Off“ von Projekt relevanten Fasermischungskomponenten. Der Entwicklungsansatz wurde dabei bewusst sehr breit aufgestellt und berücksichtigte unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten neben handelsüblichen auch recycelte Fasermischungskomponenten. Zudem wurde in der Herstellung einer Energiebilanz im Herstellungsprozessen Rechnung getragen. Dabei wurde z.B. auch geprüft, inwieweit die Rückführung von im Produktionsprozess entstandenem C-Frässtaub in das zu neu generierende Material möglich ist oder ob Materialkombinationen in hybrider Form eine Lösung darstellen könnten.

Folgende Gruppen von C-Fasermaterialien wurden untersucht bzw. entwickelt:

- Standardmaterial (auf dem Markt verfügbar)
- Langfasermaterial
- Material mit geschnittenen Fasern
- Materialmischungen aus geschnittenen und gemahlene Fasern
- Material aus C-Vliesen und C-Geweben



Abbildung 8: Faserarten v.l.n.r.: C-Longfaser, C-Kurzfaser geschnitten, C-gemahlene Fasern, C- Gewebe

Nach der Verwendung der in ihren mechanischen und thermischen Eigenschaften unterschiedlicher Fasertypen und dem Zusatz von pulverförmigen Phenolharzen sowie weiteren für die Materialqualität relevanten Komponenten wurden daraus Fasermischungen generiert, welche nach thermischer Formgebung und Pyrolyse als Rohmaterial für die anschließende Infiltration mit Silizium dienen.

Da die thermische und mechanische Anforderung an die anvisierte Materiallösung eines C/SiC's nach der in Kapitel 2.1 genannten Spezifikation eine Herausforderung darstellten, wurden in den Lösungsansatz neben singulären Materialvarianten auch hybride Materiallösungen als auch Oberflächenverfahren (z.B. die Verwendung einer Schlichte oder Beschichtungen) mit einbezogen.

Der Herstellungsprozess und damit der Entwicklungsumfang für das C/SiC impliziert eine Vielzahl von, für die Performance des Materials wichtige Prozesse, welche ebenfalls Teil der Entwicklung wurden. Diese sind neben der Auswahl geeigneter Komponenten für die Materialmischung auch das

- Mischen der Komponenten nach zu entwickelnden Verfahren
- Pressen der Mischungen nach zu entwickelnden Druck- und Temperaturprofilen
- Verkoken (Pyrolyse der gepressten CFK-Blöcke, um ein poröses Grünmaterial zu erhalten aus dem dann C-Proben und C-Formteile geschnitten oder gefräst werden können)
- Infiltrieren der porösen C-Proben und C-Formteile mit Silizium

- Bearbeiten der fertigen C/SiC Proben oder Formen zur Vorbereitung für die Tests und die spätere finale Endbearbeitung bei Firma Breuckmann

Jeder einzelne Prozess hat hier einen entscheidenden Einfluss auf die Materialqualität.



Abbildung 9: Pressen der Mischungen zu CFK-Blöcken 180x180x75mm, in thermisch gesteuerter Presse

Zur Generierung der duktilen Faserkeramik mussten die Zusammenhänge innerhalb eines jeden Einzelnen, als auch die Wechselwirkungen in der Gesamtheit der Materialherstellungsprozesse erarbeitet sowie das Endergebnis beurteilt werden. Der wesentliche Beitrag in diesem Projekt war deshalb nicht nur die Produktion der Proben und Keramikformen, sondern auch die Auswertung der Ergebnisse nach dem Testen des Materials in den Gussprozessen.

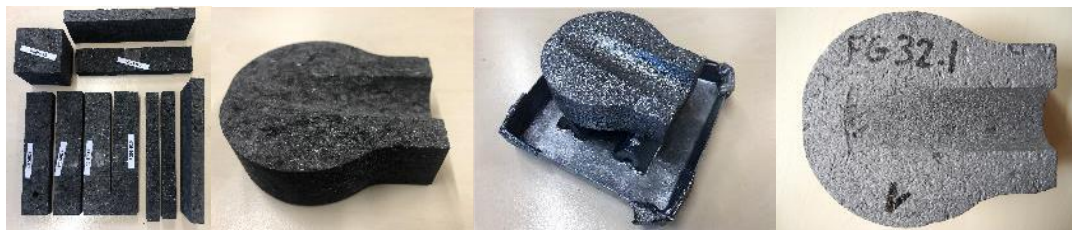


Abbildung 10: v.l.n.r. C/C-Block Materialproben, C/C Formteil, Formteil mit Si infiltriert bzw. sandgestrahlt

Die Spezifikation eines Materials erfolgte zunächst aus Erfahrungswerten und unter Berücksichtigung von Vorversuchen aus der Materialprüfung, eines ersten Formdesigns, erster FE-Berechnungen, sowie unter Berücksichtigung späterer energieeffizienter Herstellungsprozesse (z.B. Infiltrations- und Bearbeitungsmöglichkeiten).

Folgendes Diagramm zeigt den in der Entwicklung angestrebten Optimierungszyklus:

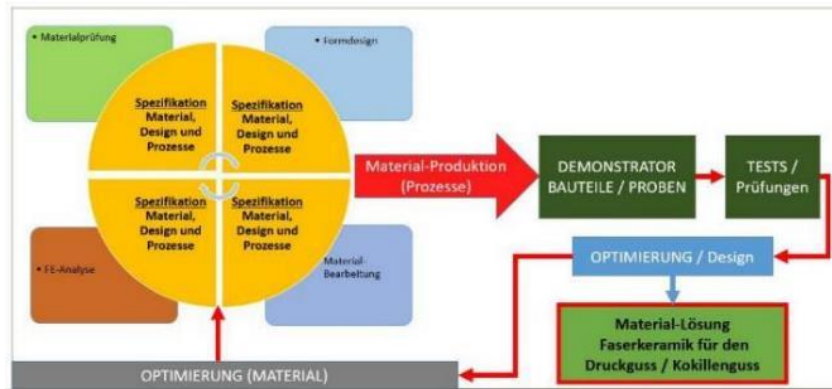


Abbildung 11: Materialentwicklungsprozess für die duktile Faserkeramik

ECM hat für den Materialentwicklungsprozess ein detailliertes Probenprogramm entwickelt. Produziert wurden entsprechend dem oben skizzierten Herstellungsprozessen für das C/SiC Material **insgesamt 52 Materialvariationen** (mit unterschiedlichen Fasertypen inkl. recycelte Fasern).

Diese Materialien manifestierten sich in 52 CFK- Blöcken (180x180x75 mm) die im Verlauf des Projektes produziert und nach der Pyrolyse sowie C/C-Fräsen zu C/SiC Proben und Bauteilen wurden. Vorbereitend zur Endbearbeitung bei Breuckmann wurden alle Proben und die meisten Bauteile auch bei ECM geschliffen.

Tabelle 3: Anzahl der produzierten Proben aus 52 C/SiC Material-Rohblöcken

PROBENART	Abmessungen	Anzahl produziert
Infiltrationsproben	50 x 50 x 50 mm	23
DIP-Test, Thermoschock und Bruchtests-Proben	125 x 25 x 13 mm	410
Flachproben für 4-Pkt. Biegetests nach DIN 843	120 x 20 x 3 mm	150
Probenmaterial für CT und Wärmeleitfähigkeit	10 x 10 x 120 mm	16
SUMME Proben		538

Tabelle 4: Anzahl der produzierten Formteile aus 52 C/SiC Material-Rohblöcken

Formteile / Gussformen	Abmessungen	Anzahl produziert
Druckstück (Einsätze)	72 x 65 x 25 mm	24
Druckstück (komplett)	120 x 100 x 35 mm	4
Kern	75 x 25 x 20 mm	4

Prototyp-Druckgussform	120 x 100 x 15 mm	6
Kokillenguss-Testriegel Ab- formungswinkel	120 x 25 x 13 mm	9
SUMME Gussformen		42

Probenprogramm und Inspektionsverfahren

Die Inspektionen der Materialien führte ECM vor und nach den geplanten Tests (z.B.: Dip-Test, Kokillengusstest, Druckgusstest) durch. Zum Einsatz kamen dabei folgende Inspektions-, Mess- und Analyseverfahren:

- Vier-Punkt Biegetest DIN EN 843-1 (Bestimmung Festigkeit und E-Modul, ...)
- Thermoschock-Test nach DIN EN 820-3 (Testtemperatur 900°C)
- Prüfung des Oberflächenverhaltens und der Mikrostruktur DIN EN 623-4
- Mikrostruktur und Rissanalyse (Dye-Penetration-Tests) DIN EN 623-4
- Rauigkeitsmessungen nach den Tests DIN EN 623-4

Zur Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten, der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität (RT bis 1300 °C) sowie für die CT (Computer-Tomographie) und REM-Aufnahmen wurden externe Prüflabore beauftragt.

Die oben genannten Analyse- und Testverfahren sind hier mit Abbildungen und Stichworten kurz skizziert:

Mit den 4-Punkt Biegetests wurden die Materialkennwerte für die Festigkeit und das E-Modul der Materialien nach DIN EN 843-1 ermittelt. Die Dichte, Mikrostruktur Bruchbilder und Faserverhalten an den Bruchstellen sowie Untersuchungen mit dem Mikroskop wurden in die Ergebnisbetrachtung einbezogen.



Abbildung 12: 4-Pkt.Biegetest, Zwick Prüfmaschine, Bruchflächen Kurzfaserver- und hybrides Material

Testprozedur Thermoschocktest:

Materialanalysen der Proben fanden jeweils nach einem und später erneut nach fünf Thermoschocktests statt um ein eventuelles Propagieren der Rissbilder zu detektieren. Die dabei verwendete Testprozedur ist hier kurz skizziert:

- Vorheizen des Testofens auf eine Innenraumtemperatur von 900°C
- Einlegen der zu testenden und auf Raumtemperatur (20°C) befindlichen FG-Materialien auf den glühenden Schamott der Ofeninnenauskleidung (Dauer: 5 sec.)
- Temperieren der Proben bei 900°C für 15 Minuten (Proben weiß-glühend)
- Entnahme der Proben aus dem Ofen und sofortigen einwerfen in ein auf Raumtemperatur (20°C) befindliches Wasserbad
- Inspektion der Proben mit dem Mikroskop (für Risse > 5µm) und Rissuntersuchungen nach eine entwickelten Dye-Penetration Test (Detektieren von Rissen > 2 µm)



Abbildung 13: Testprozedur Thermo-Schocktest, Delta T=900° C (Aufheizen und Abkühlen)

Prüfung des Oberflächenverhaltens und der Mikrostruktur (Mikroskop):

Gut sichtbar sind hierbei die Verteilung des Volumenfasergehaltes sowie die Phasenkomponenten Kohlenstoff (schwarz), Siliziumcarbide (dunkelgrau) und freies Silizium (hellgrau). Zudem dienten die Aufnahmen zur Vermessung möglicher Mikrorisse.



FG 27 Probenoberfläche nach Thermoschock-Test (5x 900°C) 280x Vergrößerung



FG 9 Probenoberfläche nach DIP-Test 280x Vergrößerung



FG 42 Probenoberfläche Thermoschock-Test (5x 900°C) 280x Vergrößerungen hier mit Mikrorissen

Abbildung 14: Analyse Oberflächenverhalten und Mikrostruktur von den Faserkeramik Materialien

Beschichtungen

Im Entwicklungsprojekt wurden zudem der Einfluss von Beschichtungen auf das Oberflächenverhalten und die Performance der Faserkeramiken ausgelotet. Dieses Thema ist allerdings so umfangreich, dass es über das geplante Projektvolumen hinausgeht. Dieses Thema sollte evtl. in einem Anschlussprojekt gesondert betrachtet werden.

Die zur Anwendung kommenden Beschichtungsmethoden waren:

- a) Duktiles Trägermaterial mit einer infiltrierten C-Vlies Schichtung, (Hybrides Material)

b) SiC –Beschichtung, Formteile mit Siliziumcarbid beschichtet

c) Anwendung von Schichten im Druckgussprozess (Grafit, Bornitrid, ...) die als Trennmittel auf die Formteilerfläche aufgebracht wurden



Abbildung 15: hybride C/C Materialproben (links), infiltriert mit SiC-Beschichtung (rechts)

Probenprogramm

Die Methodik, welche zum Testen der Materialien zur Anwendung kam, spiegelte sich in einem Probenprogramm, welches aus einer Verkettung von Einzeltests bestand.

Neben den Materialtests, die sich dem Herstellungsprozess anschlossen (siehe oben) wurden dabei Tests (für ausgewählte Materialien) im Kontakt mit der Metallschmelze in folgender Reihenfolge durchgeführt:

- Bearbeitungstests an den neu geschaffenen Materialien
- Dip-Tests, anwendungsnahe Thermoschocktest durch abwechselndes Eintauchen in Kupferbasisschmelze und wasserbasierter Graphitschichte/Bornitrid-Schichte
- Kokillenguss-Test, Performance der hergestellten Gussform im Schwerkraftgusstest
- Druckguss-Test, Performance der hergestellten Gussform im Druckguss

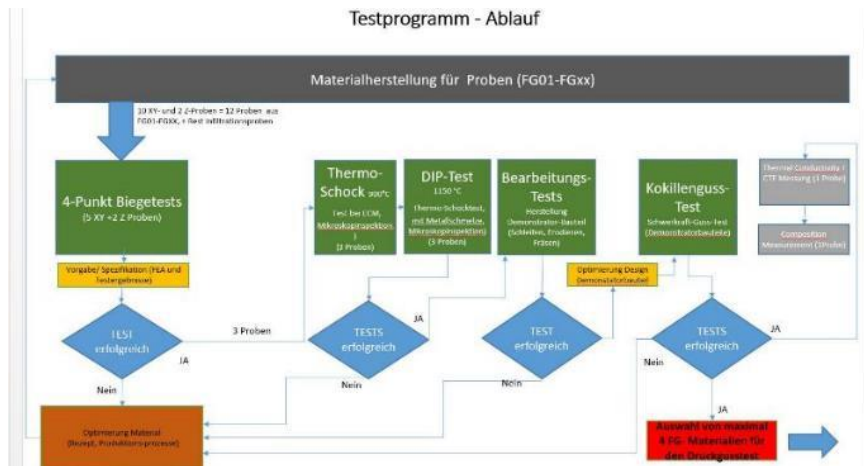


Abbildung 16: Materialproben - Testprogramm

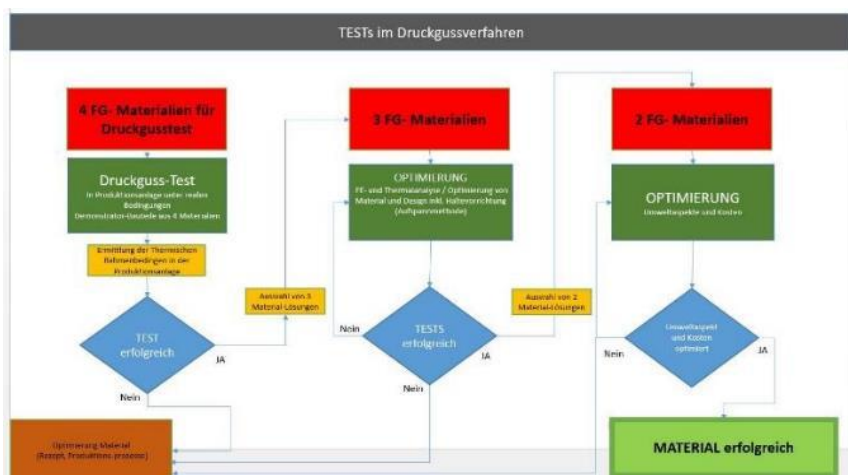


Abbildung 17: Optimierung im Druckgussverfahren

Gegen Ende des Projektes wurden noch zwei weitere Testverfahren eingeführt, um speziell die Thematik der Abformungsschräge für Keramiken zu untersuchen:

- Prototyp-Druckgusstest, Performance der hergestellten Gussform in der Prototyp-Gussvorrichtung
- Test-Entformungsschräge zur Untersuchung der Material-Performance in einer simulierten Kokillenguss-Vorrichtung (Test von drei unterschiedlichen Entformungsschrägen/-winkeln von 5°, 2° und 1°.)

Materialentwicklungsmatrix

Die Komplexität der Einflussfaktoren in den Herstellungsprozessen, als auch das Erarbeiten von Ergebnissen innerhalb des Testprogramms erforderten eine gewisse Anzahl von Materialvariationen. Die damit verbundene hohe Anzahl von Proben und Testbauteilen erlaubte, Variablen in der Materialherstellung (von der Materialrezeptur bis

zur getesteten Gussform aus Faserkeramik) zu identifizieren und für die Anwendung zu optimieren. Eine für das Projekt entwickelte Datenbank (Entwicklungsmatrix) mit Mess- und Testergebnissen aus dem oben beschriebenen Entwicklungsprogramm diente als Grundlage für die Priorisierung der jeweiligen Materialien (sowohl für den Druckguss als auch für den Kokillenguss). Die neu entwickelten Materialien wurden dabei mit FG (Faserkeramik Gusstechnik) und einer 2 bzw. 3-stelligen Identifikationsnummer bezeichnet (z.B. FG 32.1).

Eine Bewertung der Faserkeramiken (FG-Materialien) erfolgte in 2 größeren Gruppen, einmal bezüglich der Materialeigenschaften und zum anderen bezüglich der Testergebnisse aus dem Probenprogramm.

Bewertung Materialeigenschaften:

- **Materialherstellung (Produktionsprozesse, spezifische Materialrezeptur)**
Gemessen wurden die Anteile und die spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Phenolharze, Faserarten und Zusatzstoffen sowie die der verwendeten recycelten Komponenten. Bestimmt wurden auch die für die Materialherstellung relevanten Dichten z.B.: der Fasermischung (Schüttsichte), der CFK-Rohblöcke als auch nach der Pyrolyse die C/C Dichten und die später infiltrierten Dichten.
Bewertet wurde die Verwendbarkeit der Materialkomposition in den Herstellungsprozessen (Mischbarkeit, thermisches Verformen der CKF-Körper, Pyrolyse und Infiltration).
- **Materialkennwerte (mechanisch und thermisch)**
Gemessen wurden die Dichten der infiltrierten Proben und Formen, die Festigkeit und das E-Modul des neuen Materials, als auch selektiv der Wärmeausdehnungskoeffizienten/Wärmekapazität und das Gefüge in der Mikrostruktur
Bewertet wurde aufgrund der Messdaten die Plausibilität einer möglichen Verwendung des Materials für den geplanten Anwendungsfall.
- **Oberflächen/Bearbeitung/Beschichtung**
Gemessen wurde die Rauigkeit des Materials, die Porengröße/Anzahl sowie im Falle einer Beschichtung die Schichtdicke.
Bewertet wurde aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit die Eignung des Materials für Gussprozesse. In die Bewertung mit aufgenommen wurde auch die Eig-

nung des Materials zum Bearbeiten (Erodieren, Schleifen, Fräsen) und zum Beschichten.

Bewertung aus den Ergebnissen des Testprogrammes Gusstechnik:

Thermoschocktest, T900°C (ECM)				DP-Test (Proben in Metallschmelze)				Versuchsergebnisse - KOKILLINGUSS				Versuchsergebnisse - DRUCKGUSS					
Thermoschockbeständigkeit (IX)	Mikro-Risse (IX)	Thermoschockbeständigkeit (IX)	Mikro-Risse (IX)	Risse und Schädigungen	Ablöseverhalten (einfach) (IX)	Rückstände nach Abblöschung	Mikrorisse und Risse	Thermoschock (IX/IX)	Ablöseverhalten (IX/IX)	Rückstände nach Abblöschung (IX/IX)	Mikro-Risse und Risse	Thermoschock (IX/100X)	Ablöseverhalten (IX/100X)	Rückstände nach Abblöschung (IX/100X)	Mikro-Risse und Risse	Mechanische Schädigungen	Bewertung/Druckguss Test
Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (keine) bis 5 (sehr)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (keine) bis 5 (sehr)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (keine) bis 5 (sehr)	Werte 1 (keine) bis 5 (sehr)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)	Werte 1 (keine) bis 5 (sehr)	Werte 1 (sehr gut) bis 5 (schlecht)

Abbildung 18: Screenshot, Ausschnitt Gussversuche aus der Bewertungsmatrix

- Thermoschocktest 900°C nach Prozedur**
Vermessen bzw. analysiert wurden mit dem Mikroskop und mittels des Dye-Penetration-Tests die Thermoschockfestigkeit, d.h. die Struktur im Mikrogefüge des Materials inklusive möglicher Risse und/oder Mikrorisse.
Bewertet wurde die Verwendbarkeit der jeweiligen Materialkomposition für den geplanten Anwendungsfall nach einfachem und mehrfachem Thermoschock
- Dip-Tests (Kontakt mit Metallschmelze)**
Vermessen bzw. analysiert wurden Schädigungen wie Abplatzungen/Risse, Mikrorisse, das Ablöseverhalten der Schmelze, die Rückstände nach der Ablösung. Hierzu wurden die Testergebnisse der Firma Breuckmann herangezogen und mit Ergebnissen aus der von Materialanalyse nach den Tests ergänzt.
Bewertet wurde die Verwendbarkeit der jeweiligen Materialkomposition für den geplanten Anwendungsfall nach einfachen und mehrfachen Dip-Tests.
- Kokillenguss (Schwerkraft-Gussverfahren - Kontakt mit Metallschmelze)**
Vermessen bzw. analysiert wurden Schädigungen wie Abplatzungen/Risse, Mikrorisse, das Ablöseverhalten der Schmelze, die Rückstände nach der Ablösung. Hierzu wurden die Testergebnisse der Firma Breuckmann herangezogen und mit Ergebnissen aus der von ECM-Materialanalyse nach den Tests ergänzt.
Bewertet wurde die Verwendbarkeit der jeweiligen Materialkomposition für den geplanten Anwendungsfall nach einfachem und mehrfachem Kontakt mit der Schmelze.

- **Druckguss (Kontakt mit Metallschmelze im Druckgussverfahren)**

Vermessen bzw. analysiert wurden Schädigungen wie Abplatzungen/Risse, Mikrorisse, das Ablöseverhalten der Schmelze, die Rückstände nach der Ablösung. Hierzu wurden die Testergebnisse der Firma Breuckmann herangezogen und mit Ergebnissen aus der von ECM-Materialanalyse nach den Tests ergänzt. Bewertet wurde die Verwendbarkeit der jeweiligen Materialkomposition für den geplanten Anwendungsfall nach einem und mehrfachem Kontakt mit der Schmelze sowie die maximale noch vertretbare Anzahl von Druckgusszyklen mit der Keramikform.

Ergebnisse aus der Materialentwicklungsmatrix:

Die zu ermittelnde Materiallösung für den/die geplanten Anwendungsfall/Anwendungsfälle erforderte eine Gewichtung der oben genannten Bewertungen, steht's unter dem Aspekt die Funktionsfähigkeit einer Faserkeramik-Gussform zu gewährleisten und deren Lebensdauer zu erhöhen. Alle hier aufgezeigten Ergebnisse flossen in die Entscheidungsfindung für die Materiallösung mit ein und führten zu folgender Priorisierung:

Prio 1 -> FG 27.2 (Keramik mit einem hohen C-Volumenanteil mit recyceltem C-Komponenten Zusatz, Mikrogefüge nach einem bestimmten Mischverfahren sowie durch ein bestimmtes Phenolharz optimiert)

Prio 2 -> FG 33 (Keramik mit einem hohen C-Volumenanteil, Mikrogefüge nach einem bestimmten Mischverfahren und durch ein bestimmtes Phenolharz optimiert).

Prio 3 -> FG 35.3 (Keramik mit einem hohen C-Volumenanteil, Mikrogefüge nach einem bestimmten Mischverfahren sowie durch ein bestimmtes Phenolharz optimiert)

Die Anhänge B, C und D fassen diese Ergebnisse für alle entwickelten Materialvarianten zusammen. (siehe Anhänge B, C und D)

Ergebnisse aus mechanischen Testverfahren

Da die im Projekt entwickelte bessere Infiltrationsfähigkeit des Materials das Design massiver statt dünnwandiger Gussformen erlaubt, ergeben sich für die geplanten Anwendung der Keramiken im Druckgussverfahren auch andere mechanische Lastfälle.

Diese Keramiken werden, abgesehen von den Kräften wie sie sich beim Auswerfen der Gussteile an der Keramik gestalten, vorwiegend auf Druck belastet. Aus „Crashing Tests“ für das Standard-Material HB-Cesic (hiermit FS1 bezeichnet) wurden in einem kürzlich durchgeführten „Crushing-Test“ 1000N/mm^2 als Richtwert gemessen. Aufgrund der etwas geringeren Dichte des FG-Materials wird auch die maximale Druckbelastung niedriger (etwa 10%) und damit dennoch unkritisch für den hier geplanten Anwendungsfall sein. Bezüglich der Auswahl geeigneter Materialvarianten für das Druckgussverfahren wurde mittels FE-Rechnung ein Wert von ca. 90 -120 MPa für die Festigkeit ermittelt und für die Duktilität ein E-Modul von 80-110 GPa angestrebt. Dieses angestrebte Ziel wurde für 40% der neuentwickelten Materialien erreicht. Sollte eine höhere Duktilität oder höhere Festigkeit für die Keramik erforderlich sein, stünden dazu bereits alternativ entwickelte Materialien zur Verfügung (siehe Diagramm im Anhang B). Hybride Materialvarianten sind in der Abbildung mit einem zusätzlichen „H“ gekennzeichnet (z.B. FG-10H).

Das Material FG-15 ist als komplett recyceltes Material zu bezeichnen, da es sich aus reinem C-Staub, der sich als Abfallprodukt aus den Fräsprozessen am C/C Rohmaterial mit wenigen Zusatzkomponenten zusammensetzt. Die mechanische Performance dieses Materials ist relativ gut. Leider aber ist es kaum thermoschockbeständig und für den Druckguss so nicht zu verwenden. Als Zusatz in den Mischungen FG 27, FG24, FG35 findet es dennoch Anwendung in diesem Projekt.

Ergebnisse aus den thermischen Testverfahren

Für die Verwendbarkeit der duktilen Faserkeramik im Druckguss sind zudem die thermischen Eigenschaften als auch das Oberflächenverhalten der Keramiken von hoher Bedeutung. Der Umfang einer entsprechenden Analyse und die Bewertung dieser Eigenschaften wurden oben bereits beschrieben. Die Ergebnisse der Thermoschock-Untersuchungen sind im Anhang C für alle untersuchten FG-Materialien dargestellt (siehe Anhang C).

In 42% der produzierten FG-Materialien überstanden den Thermoschock-Test mit einer Bewertung zwischen 1- 2 (sehr gut bis gut geeignet) für die geplante Anwendung. Den Thermoschocktest nach dem DIP-Verfahren also in Kontakt mit der Metallschmelze überstanden mit gleicher Bewertung sogar 63% oder 33 FG-Materialvariationen. Der höhere Anteil von positiven Tests nach dem DIP-Testverfahren ist (ab FG-21) auf die

Verwendung der entwickelten BN-Schlichte in den Tests zurückzuführen. Diese hatte nachweislich zu einer wesentlichen Verbesserung der Thermoschockbeständigkeit geführt.

Die Untersuchungen zu den Hybriden-Materialvarianten (FG06H-V1 und FG07H-V4) zeigten unterschiedliche Ergebnisse nach der Thermoschock Prozedur und im Dip-Test. Obwohl das silizierte Vliesgewebe an der Oberfläche ein sehr gutes rückstandsloses Ablöseverhalten zeigte, kam es aufgrund der CTE-Unterschiede in der Anbindung an das Trägermaterial (FG18) zur Schädigung der Oberfläche im Testverfahren. Für die übrigen Materialien waren die Ergebnisse der beiden Testverfahren in den meisten Fällen jedoch ähnlich.

Ergebnisse aus den Gussverfahren (Kokillengusstest, Druckgusstest)

Den Schwerkraftguss-Test absolvierten 16 der FG-Materialvariationen mit einer Bewertung von 1-2 (sehr gut bis gut geeignet) für die später geplante Anwendung. Davon wurden im anschließenden Druckgussverfahren sechs der Materialien getestet. Aus Materialtechnischer Sicht, d.h. nach Analyse der Demonstratoren nach den oben erwähnten Inspektions- und Analyseverfahren erfolgte anschließend erneut eine Bewertung. Dabei zeigten sich sechs FG-Materialien als gut geeignet. Schädigungen durch konstruktive mit dem Design der Aufnahmevorrichtung bzw. System- oder Prozessbehaftete Einflüsse der Druckgussanlage wurden für die Bewertung des Materials hier ausgeklammert.

Thermische Materialeigenschaften ausgewählter FG-Materialien:

Tabelle 5: Wärmeausdehnungskoeffizienten Keramik für eine Auswahl von FG-Materialien

MATERIAL	CTE [*10-6] bei RT	CTE [*10-6] bei 600°C
FG 15	3.7	4.25
FG 27	3.9	5.25
FG 35.2	3.68	4.75
FG 35.3	4.15	5.42
FG 39	3.75	4.8
FG 42	4.18	6.55
Mittelwerte	3.89	5.17

2.5 Entwicklung der keramischen Formeinsätze

Für die Entwicklung der keramischen Formeinsätze wurde zunächst das Standardmaterial HB-Cesic herangezogen, da zu diesem Material alle Materialeigenschaften bereits bekannt sind. Die Daten für die neu entwickelten Materialien wurden erst im Laufe des Projektes für die darin ermittelten Materiallösungen ermittelt.

2.5.1 FE-Analysen & Thermalanalysen zum Design

Ein Problem schon zum Projektbeginn bestand darin, das Design für die Pressformen dem keramischen Material angepasst sein muss. Die keramischen Besonderheiten, in diesem Fall von HB-Cesic, waren zu berücksichtigen um „ein Keramik gerechtes Design“ zu erstellen. Die Verwendung von HB-Cesic z.B. limitierte die zur Anwendung kommenden Wandstärken auf max. 8 bis 15 mm. Deshalb war es nötig Taschen zu fräsen, da sonst eine sichere Infiltration mit SI nicht gewährleistet werden konnte. Abgeleitet aus der FE-Analyse sollte das Material einer Belastung von 90 - 120MPa standhalten. Wird das Material allerdings auf Zug belastet ist dies sehr wohl schon ein Problem und die Anwendung von HB-Cesic kritisch. Hinzu kommen die thermalen Belastungen für die Struktur, welchen das Material HB-Cesic in diesem Anwendungsfall nicht genügte.

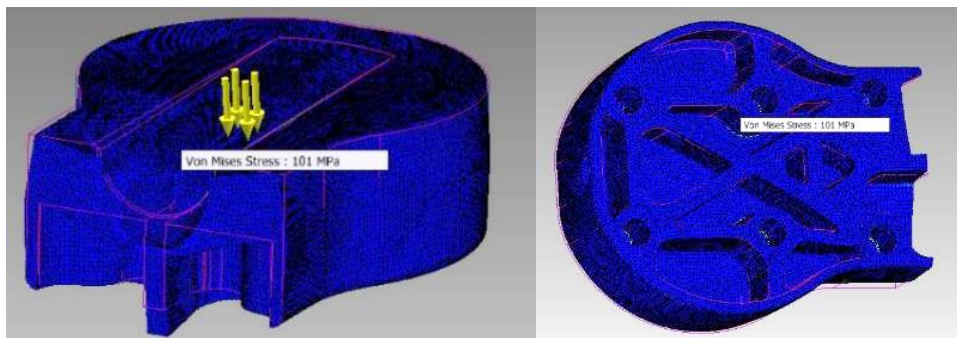


Abbildung 19: FE-Analyse zur Belastung eines Druckstückes aus dem Material HB-Cesic

Im Zuge der weiteren Materialentwicklung war es dennoch sehr schnell gelungen ein Material herzustellen, welches bei hoher Festigkeit und niedrigem E-Modul auch die Infiltration von dickwandigen massiven Formteilen erlaubt, wie diese im Formenbau für die Druckgusstechnik speziell, als auch für die Gusstechnik allgemein gefordert sind. Dies bedeutete zudem, dass die Formen einfacher und energieschonender werden konnten, der Designprozess einfacher war und auch die Maschinenzeiten (z.B. zur Generierung der dünnen Wandungen) entfielen.

Die Optimierung des Infiltrationsverhaltens für die jeweiligen Materiallösungen war deshalb von großer Bedeutung.

Eine zweite Herausforderung ergab sich aus der Unterschiedlichkeit der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Keramik und Metall. Das bedeutet implizit die Anbindung der Keramik in den Druckgussprozess mit allen metallischen Interfaces (z.B. Haltern).

Ziel für die Entwicklung war hier eine verträgliche Lösung zu finden, welche die CTE-Problematik reduziert bzw. eliminiert. Entsprechende Vorkehrungen sollten in der Entwicklung der Halter bzw. den Befestigungsmethoden der Keramik berücksichtigt werden. Deshalb wurden deshalb alle Gussformen mit Öffnungen zur Aufnahme von Thermoelementen zur Aufzeichnung der Temperaturen im Gussprozess ausgestattet.

Thermische Materialeigenschaften:

Nach umfangreicher Analyse der mechanischen Materialeigenschaften sowie der des Mikrogefüges vor und nach den Tests wurden für eine Auswahl von relevanten Materialien auch die thermischen Kenndaten bestimmt.

In dem umfangreichen Probenprogramm war es möglich, Einflussfaktoren in der Materialkomposition zu identifizieren und damit gezielte thermische oder mechanische Eigenschaften zu generieren. Damit bestand auch über den hier untersuchten Anwendungsfall (Druckgussprozess, Kokillengussprozess) hinaus, die Möglichkeit die Keramiken für ihre spezifische Einsatzart zu optimieren.

2.5.2. Auslegung und Konstruktion der keramischen Pressformen

Die Auswirkungen der Infiltrationsfähigkeit der Keramik auf das Design und die CTE-Problematik wurden oben bereits erwähnt.

Größte Bedeutung für die Auslegung der Keramik hatte deren Mikrostruktur. Hier definierte sich nicht nur deren mechanische Performance, aufgrund der Anbindung der Fasern in der Matrix, sondern auch deren Verhalten unter thermischen Extremfällen (Thermoshock/Wärmeleitung/...) sowie das Oberflächenverhalten.

Homogenes Material ist bezüglich einer Riss-Propagierung anfälliger als ein amorphes Material. In einem solchen Material kann sich der thermische Stress an den Grenzschichten der einzelnen Komponenten besser abbauen. Aufgrund der Verwendung von Hochleistungs-Pitch Fasern (in den Materialien ab FG27), die sich nicht nur durch eine

hohe Zugfestigkeit, sondern auch als hervorragend wärmeleitend erwiesen, konnten die thermalen Spannungen, abhängig von der Form der Durchmischung im Mikrogefüge in unterschiedliche Richtungen abgelenkt werden. Der Grad der Durchmischung ist dabei bestimmt von der Verteilung der Faserlängen in dem Gefüge. Unabhängig von der Komposition oder dem Rezept der Mischung bestimmte die Verteilung der Faserlängen und deren Verzahnung die Thermoschockbeständigkeit entscheidend mit. Einzelne Bündel der im Mischvorgang zerkleinerten C-Fasern sind auf den Oberflächen der Materialien gut sichtbar.

Das Sandstrahlen nach dem Infiltrationsprozess zur Entfernung des überschüssigen Siliziums kann solche Faserbündel aus der Oberfläche reißen. Es ist deshalb wichtig bei der Auslegung der Formen genügend Aufmaß zu berücksichtigen, damit eine glatte Porenfreie Fläche erodiert oder geschliffen werden kann. Die beispielhafte Umsetzung der Demonstrator Pressformen in den drei Fertigungsschritten C/C-Rohmaterial (mit Aufmaß), der Infiltration mit Si und der Endbearbeitung (Schleifen) kann den Abbildungen im Anhang E entnommen werden.

2.6 Einflussfaktoren zur Bewertung der Mess- und Testergebnisse

Die in dem umfangreichen Probenprogramm genannten Messwerte und Ergebnisse aus den Testprogrammen geben teilweise nur Einzelergebnisse einer bestimmten keramischen Gussform oder Materialprobe in einem bestimmten Test wieder.

Zur genaueren Bewertung sind diese Einzelergebnisse auch unter statistischen Gesichtspunkten zu betrachten.

Die Versagenswahrscheinlichkeit wäre demnach mit einer Weibull-Statistik zu erfassen gewesen. Um diese Aussagekräftig zu gestalten, wäre dafür eine Mindestanzahl von 30 Tests pro Materialvariante erforderlich gewesen. Dies war im Rahmen dieses Projektes aus zeitlichen und finanziellen Gründen nicht zu realisieren.

2.7 Integration der keramischen Formeinsätze

Die Experimente und Untersuchungen der Materialien auf Probenlevel war in dem Projekt von großer Bedeutung, um die Faserkeramik auf den Druckgussprozess zu integrieren und dessen Anforderungen zu erfüllen. Somit wurde die Thermoschockbeständigkeit der einzelnen keramischen Materialien während des gesamten Projekts mit sogenannte Dip-Tests untersucht. Dazu wurden die Dip-Proben vor dem Eintauchen in die

Schmelze im Gießofen vorgeheizt, um ggf. vorhandene Restfeuchtigkeit zu verdampfen. Danach wurden sie für fünf Sekunden in die Schmelze getaucht. Anschließend wurden die Anhaftungen entfernt und eine Schlichte wurde aufgetragen. Der Vorgang wurde wiederholt, bis die Proben brachen oder sie zehn Durchgänge überstanden haben. Während der Versuchsreihe wurde eine Fotodokumentation geführt. Der genaue Versuchsplan ist im Anhang F veranschaulicht.

Anfänglich erreichten viele Proben nicht die zehn Durchgänge aufgrund frühzeitiger Rissbildung während der einzelnen Durchgänge. Dies führte somit zum frühzeitigen Bruch. Anhaftungen wurden durch die Schlichte größtenteils beseitigt, aber Rückstände vom Gussmaterial an der Keramik waren vorhanden. Ein Beispiel dafür ist Abbildung 20, in der eine Dip-Probe nach dem ersten Eintauchen in die Schmelze bricht.



Abbildung 20: Dip-Probe anfangs der Versuchsreihe

Die vielen verbesserten Materialkompositionen führten zu deutlichen Verbesserungen hinsichtlich der Thermoschockbeständigkeit: makroskopische Risse bildeten sich nur noch selten. Auch die Rückstände an der Oberfläche des Materials und die Materialporosität reduzierten sich. Die Abbildung 21 zeigt einen Ausschnitt der dokumentierten Dip-Tests. In den zehn Durchgängen wurde keine Rissbildung oder Materialversagen festgestellt.

Probe	Beobachtungen	Anhaftungen	Durchgänge
FG27.1-B6	<ul style="list-style-type: none"> kein Materialversagen keine Risse 	<ul style="list-style-type: none"> leicht lösbar kleine Anhaftungen nach dem Schlichten keine Rückstände 	10



Vor dem Versuch



Nach dem Versuch

Abbildung 21: Dokumentation einer Dip-Probe im späteren Verlauf

Ergebnisse aus Materialanalyse der DIP-Test Proben:

Das Detektieren von Mikrorissen erfolgte neben der mikroskopischen Analyse auch mit Dye-Penetration-Tests nach einer Prozedur. Selektiv wurden auch Elektronenmikroskop Aufnahmen zur Untersuchung der Faseranbindung in der Matrix der Composites hinzugezogen.

Ein weiterer Materialtest waren die Versuche für den Schwerkraftguss, welcher ebenfalls im Verlauf des Projektes bessere Ergebnisse lieferte. Diese Versuche sollten Rückschlüsse auf die thermische Beständigkeit der Druckstücke (als erste komplexere Geometrie) bei asymmetrischer Temperatureinbringung und somit inhomogener Temperaturverteilung liefern, bevor diese zusätzlich mechanisch belastet im Druckguss eingesetzt werden.



Abbildung 22: Prüfstandversuch Schwerkraftguss

In Abbildung 22 ist der Aufbau des Prüfstands für die Versuche zu sehen. In dieser wurde das Siliziumtombak eingegossen. Das Druckstück befindet sich am Abguss der Gießkammer und sowohl das Druckstück als auch die Gießkammer wurden vor Versuchsbeginn temperiert.

Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen Versuchsergebnisse und die Fortschritte, die im Laufe der Versuchsreihen erzielt wurden. Beispielsweise trat in Abbildung 23 schon nach dem ersten Eingießen ein Riss im Material auf, welcher sich im zweiten Durchgang ausbreitete. Nach dem dritten Durchgang wurde der Versuch abgebrochen, da der Riss auch im Anguss sichtbar wurde.



Abbildung 23: Dokumentation einer Schwerkraftguss-Probe am Anfang der Versuchsreihe

Die Proben in Abbildung 24 zeigten dank gezielter Materialentwicklung und der Anwendung einer Bornitrid-Schlichte, auf welche zum späteren Zeitpunkt noch genauer eingegangen wird, erhebliche Verbesserungen. Diese führten zu einer Vielzahl an Durchläufen ohne sichtbare Beschädigung oder Materialversagen. Sogar die Angüsse blieben frei von Rissen.



FG24-DR4

- Auftragen der Schichte alle 2-3 Abgüsse
- Problemloses Ablösen des Gussteils
- Keine Brüche oder Beschädigung der Probe sichtbar
- 15 Durchläufe

FG31-DR

- Auftragen der Schichte alle 2-3 Abgüsse
- Problemloses Ablösen des Gussteils
- Keine Brüche oder Beschädigung der Probe sichtbar
- 15 Durchläufe



Abbildung 24: Dokumentation einer Schwerkraftguss-Probe im späteren Verlauf der Versuchsreihe

Ergebnisse aus Materialanalyse der keramischen Schwerkraftgussproben (Kokillenguss-Test):

Für die Versuchsreihe der keramischen Schwerkraftgussproben wurden neben den Demonstratoren aus FG-Materialien auch hybride- sowie beschichtete Materialproben produziert und getestet.

Das Detektieren von Mikrorissen erfolgte neben der mikroskopischen Analyse auch mit Dye-Penetration-Tests nach einer Prozedur. Mögliche Rissbilder werden nach diesem Verfahren besonders deutlich. Ein Sandstrahlen der Demonstratoren vor den Dye-Penetration Tests erhöhte die Wahrscheinlichkeit einen Riss zu erkennen deutlich (Rissbreiten von ab 1 - 2µm konnten damit nachgewiesen werden).

Beispiel: Nachfolgende Probe FG24-DR4-01 zeigte nach dem Test keinerlei Schädigungen des Materials.

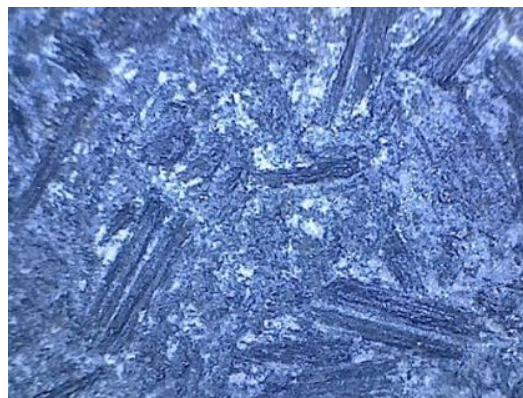


Abbildung 25: Analyse FG24-DR4-01 nach Test sandgestrahlt, Mikroskop Aufnahme 60x vergrößert

2.8 Entwicklung einer Bearbeitungstechnik

Um die Faserkeramik für die Prototypversuche vorzubereiten, musste eine Bearbeitungstechnik entwickelt werden, die es ermöglicht, das Material ohne Beschädigungen und präzise zu bearbeiten. Dies ist wichtig, um das entwickelte Material später in Serienformen einsetzen zu können. Wichtige Faktoren waren hierbei die Maßhaltigkeit und die Oberflächenqualität nach der Bearbeitung, die mit aktuellen Formwerkstoffen erzielt werden, um Bauteilqualitäten zu erzielen, die mit Kunden verumsatzt werden können. Um die bestmögliche Bearbeitungstechnik für die Faserkeramik zu ermitteln, wurden Bearbeitungsversuche mit Materialproben durchgeführt. Um die verschiedenen Bearbeitungstechniken zu vergleichen, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Zunächst wurde das Drahterodieren mit einem Kupferbasisdraht mit der Frästechnik anhand unterschiedlicher Werkzeuge (Diamantwerkzeug, Hartmetall, Sondergüten) zur Bearbeitung von Außenkonturen verglichen. Anschließend wurde der Vergleich der Bearbeitung von inneren Konturen zwischen dem Senkerodieren mit unterschiedlichen Elektrodenmaterialien und CNC-Fräsmethoden durchgeführt. Die Bewertungskriterien sind die Maßhaltigkeit, die Oberflächenqualität der Faserkeramik nach der Bearbeitung, die Abtragsgeschwindigkeit und der Verschleiß des Werkzeugs. Zur Gewichtung der Bewertungskriterien wurde ein paarweiser Vergleich durchgeführt (siehe Anhang F), wobei die Zahl 0 auf „weniger wichtig“, die Zahl 1 auf „gleich wichtig“ und die Zahl 2 auf „wichtiger“ hinweist.

Nachdem der paarweise Vergleich durchgeführt ist, erhält man die Gewichtungen der Kriterien, die in der Tabelle ausgeführt sind. Die Oberflächenqualität stellt das wichtigste Kriterium dar, da sie das spätere Gussteil beeinflussen wird. Eine raue Oberfläche würde die Qualität des Endprodukts deutlich senken, bis hin zum Ausschuss. Aus diesem Grund ist auch das Auftreten von Brandrissen bei Formen aus herkömmlichen Stählen ein Problem, das dieses Projekt lösen möchte. Ziel ist es, Risse zu vermeiden oder die Oberflächengüte zu erhöhen, um längerfristig eine produktionsfähige Oberflächengüte mit Keramiken zu erreichen, die besser als die von hochlegierten Warmarbeitsstählen ist. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Maßhaltigkeit der Bearbeitungsmethode, da eine hohe Genauigkeit erforderlich ist, unter anderem um den Keramikeinsatz später in den Stahlrahmen einzusetzen. Der Verschleiß des Werkzeugs und die Abtragsgeschwindigkeit sind weniger wichtig, müssen jedoch aus ökonomischer Sicht ebenfalls betrachtet werden.

Die Nutzwertanalysen anhand der Bewertungskriterien, verschiedener Bearbeitungstechniken für Außen- und Innenkonturen kann nun durchgeführt werden. In Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die Nutzwertanalysen dargestellt. Die Werte reichen von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut).

Tabelle 6: Nutzwertanalyse der Bearbeitungstechniken für Außenkonturen

Bewertungs- kriterien	Gewichtung	Drahterodieren	Fräsen		
			Diamant	Hartmetall	Sondergüten
Oberflächenqualität	50%	4	1	1	1
Maßhaltigkeit	33,33%	5	3	3	2
Abtragsgeschwindigkeit	8,33%	4	5	4	4
Verschleiß des Werkzeugs	8,33%	4	2	1	1
Gesamtnutzwert		4,25	2,08	1,92	1,58
Rangliste		1.	2.	3.	4.

Die Nutzwertanalyse ergab, dass das Drahterodieren die beste Technik für die Bearbeitung von Außenkonturen ist (siehe Abbildung 26). Bei dieser Technik wiesen die entscheidenden Kriterien, wie die Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit (siehe Anhang H), die besten Ergebnisse auf. Die Maßhaltigkeit liegt bei +/- 0,01mm. Auch die Abtragsgeschwindigkeit und der Verschleiß erzielten aufgrund der Tatsache, dass es sich hierbei um einen durchlaufenden Draht handelt, gute Ergebnisse.

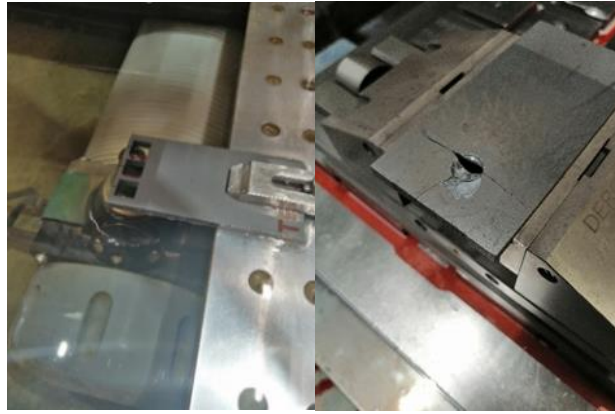


Abbildung 26: Ergebnis beim Drahterodieren (links) und Fräsen (rechts)

Beim Fräsen mit den unterschiedlichen Werkzeugen führte die erhöhte Wärmeentwicklung des Werkzeugs zu einem hohen Verschleiß, welches zu einer starken Rissbildung und schließlich zu einem Bruch der Faserkeramik resultierte, wie Abbildung 26 veranschaulicht. Somit ist eine Bearbeitung nicht ohne Beschädigung der Faserkeramik möglich. Des Weiteren ist auch die Maßhaltigkeit nicht ausreichend für die Bearbeitung. (siehe Anhang I)

Tabelle 7: Nutzwertanalyse der Bearbeitungstechniken für Innenkonturen

Bewertungskriterien	Gewichtung	Senkerodieren			Fräsen		
		Wolframkupfer	Kupfer	Graphit	Diamant	Hartmetall	Sondergüten
Oberflächenqualität	50%	3	3	3	1	1	1
Maßhaltigkeit	33,33%	4	1	3	3	3	2
Abtragsgeschwindigkeit	8,33%	5	1	3	5	4	4
Verschleiß des Werkzeugs	8,33%	3	3	3	2	1	1
Gesamtnutzwert		3,17	2,17	3,00	2,08	1,92	1,58
Rangliste		1.	3.	2.	4.	5.	6.

Nach der Nutzwertanalyse wird deutlich, dass auch hier das Fräsen vor allem bezüglich der Oberflächenqualität keine guten Ergebnisse liefert und zu Beschädigungen bei der Faserkeramik führt.

Das Senkerodieren hingegen zeigte bei der Wolframkupferelektrode angemessene Ergebnisse hinsichtlich der Maßhaltigkeit (siehe Anhang J) und auch die Abtragsgeschwindigkeit war hoch. Das Material wies jedoch eine raue Oberfläche auf. Ursächlich ist das unterschiedliche Abbrandverhalten der Faserkeramik durch Inhomogenitäten und nicht siliziertem Graphit.

2.9 Entwicklung eines Druckgussprozesses

In diesem Kapitel werden die Vorbereitung und Ergebnisse der seriennahen Tests mit Druckstückeinsätzen im Druckguss vorgestellt.

Die Druckstücke für die vertikalen Druckguss-Versuche wurden mithilfe des Halters aus Werkzeugstahl in die Stammform eingebaut. Darüber hinaus wurde ein kompletter Druckstück aus Faserkeramik mit einer Abstimmplatte in die Stammform eingesetzt, um die mechanischen Spannungen von den Verschraubungen in der Nähe des Gießkanals zu reduzieren und somit Materialversagen mechanischen Ursprungs auszuschließen (siehe Abbildung 27). Abbildung 28 zeigt einen Druckstückeinsatz mit dem Halter sowie einen Halter aus Faserkeramik im eingebauten Zustand.



Abbildung 27: Druckstück aus Faserkeramik



Abbildung 28: eingebauter faserkeramischer Halter (links) und Druckstückeinsatz (rechts)

Im Anhang K ist ein Beispiel einer kompletten Fotodokumentation dargestellt. Bei den meisten Versuchen trat anfangs nach ca. 20 Schüssen ein Riss am oberen Bereich des Einsatzes auf. Ein weitere häufige Beschädigungsart war das Aufplatzen der Kanten. Abbildung 29 zeigt Beispiele solcher Fälle in einer Versuchsdokumentation.



Abbildung 29: Beschädigungsarten der Einsätze (links: Rissbildung, rechts: Aufplatzen der Kante)

Mithilfe der Mikroskopie konnte bewiesen werden, dass die typischen Rissbildungen am oberen Bereich des Einsatzes auf die Spannungen der angebrachten Schrauben an der Hinterseite des Einsatzes zurückzuführen sind. Als zwei Alternativen zur Verschraubung sind das Einkleben des Druckstückeinsatzes an den Halter mithilfe eines speziellen temperaturbeständigen entwickelten Klebers (vom Fraunhofer Institut für Keramik) und eine Reduktion der Außenkontur der Einsätze erprobt worden. Letztere ermöglicht ein Spiel, welche vor dem Eindringen der Schmelze abgedichtet werden musste.

Ergebnisse aus Materialanalyse der keramischen Druckstücke

Die Entwicklung der Druckstücke aus der Faserkeramik erfolgte schrittweise und untersuchte zwei Integrationsformen für das Druckstück in der Produktionsanlage.

- a) Den Einsatz der Faserkeramik „Druckstück Einsatz“ in einem bereits vorhandenen Halter aus Werkzeugstahl in der Produktionsanlage. Der Einsatz berücksichtigt den Bereich des Druckstückes, der mit flüssiger Schmelze in Kontakt steht.
- b) Das komplette Druckstück, d.h. eine Kopie des in bisherigen Prozessen verwendeten metallenen Druckstückes aus Faserkeramik (wegen des Infiltrationsverhaltens des Materials, betrug die Stärke 35mm).



Abbildung 30: Druckstück-Einsatz FG28H, hybrides Material, Druckstück aus FG27.1 Material

Die Tests in der Produktionsanlage erfolgten sukzessive entsprechend dem Stand der Materialentwicklung aufbauend auf den Testergebnissen für das thermoschockfeste duktile Faserkeramikmaterial. Die Materialanalyse nach Anwendung im Druckgussverfahren identifizierte dabei hauptsächlich mechanische Schädigungen der Keramikoberflächen (infolge des Aufbaus von Schlichte-Rückständen auf der Pressform, der Einfassung oder der Anbindung der Keramik in den Halter bzw. des kompletten Druckstückes in die Produktionsanlage). Nachteilig erwies sich im Formdesign des Druckstückes die ausgeprägte Mulde des Gießkanals, welche einen wesentlichen Kerbwirkungseffekt auf die keramische Form hatte. Die mechanischen Belastungen durch das Schließen und Öffnen der Pressform, die schlagenden Belastungen im Füllvorgang, sowie der thermale Stress bedingt durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE), waren die Hauptgründe für die Schädigungen des Materials. Die Temperaturgradienten im Gussprozess waren für die gefundenen Materiallösungen unkritisch.



Abbildung 31: Druckstück-Einsatz FG33, hier eingeklebt in den Metallhalter

Dennoch trugen alle Druckstücke nach den Tests einen in der Mittellinie des Einfüllkanals markanten Längsriss. Als Ursache dieses Risses wird die Einspann- oder Haltevorrichtung für die Keramikformen vermutet. Im das Versuchsprogramm wurden deshalb unterschiedliche Installationsmethoden für die Keramikgussform mit einbezogen.

- Verschrauben mit Helicoils (Gewinde wegen CTE- Problematik erweitert)
- Einkleben in den Metallhalter (mit einem Kleber als CTE-Brücke)
- Einklemmen in den Metallhalter (mit einem C-Gewebeband als CTE-Pufferzone)

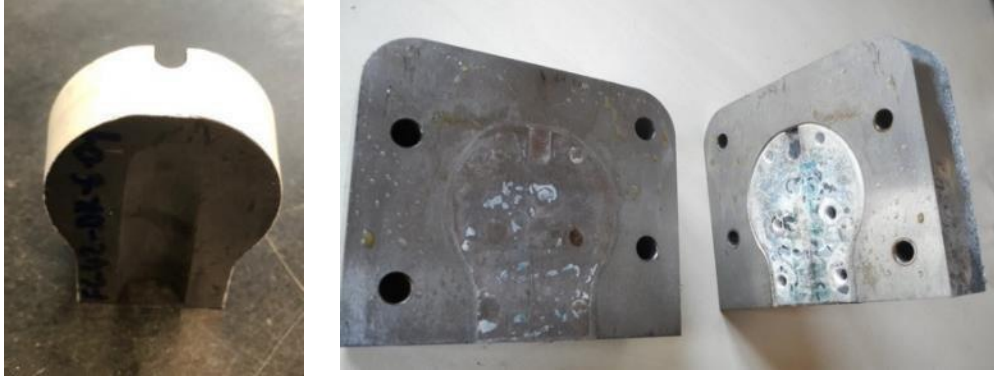


Abbildung 32: Einsatz mit Hinterschnittpassung

Da es trotz der unterschiedlichen Integrationsverfahren nicht gelungen war diesen genannten Hauptriss zu eliminieren, wurde testweise mittels Drahterodieren bereits vor dem Gießversuch die Keramik halbiert.

In der oben gezeigten Version besteht das Druckstück aus zwei zusammengesetzten Hälften und ist nicht verschraubt, sondern in der Vorrichtung mit 0,2mm Freiraum zu Kontur und damit mit 1.2mm Freiraum rückseitig versehen und gehalten. Um zu verhindern, dass in diesen Freiraum flüssige Schmelze eindringt, wurde das Druckstück entlang seiner Außenkontur und an den Fugestelle der beiden Hälften mit C-Gewebe abgedichtet.

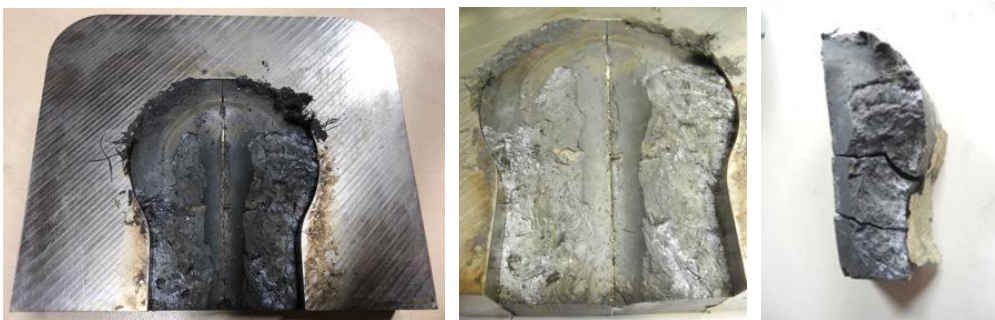


Abbildung 33: Druckstückeinsatz eingeklemmt (mit einem Spiel von 2/10mm Kontur, 1.2mm rückseitig)

Mikroskopie und Dye-Penetration Tests ergaben, dass das Material, abgesehen von den mechanischen Schädigungen, keine Mikrorisse nach dem Druckgusstest hatte. Auch der oben beschriebene Längsriss oder etwaige ähnliche Risse im Gusskanal traten nicht

mehr auf. Allerdings ist aufgrund mangelnder Abdichtung mit C-Gewebe Schmelze in die Zwischenräume zwischen Metall und Keramik gedrungen und raubte der Keramik die in dem Design vorgesehenen Freiraum zum Ausgleich der Wärmeausdehnung zwischen Keramik und Metall. Dies könnte ursächlich für die Abplatzungen entlang der Mittellinie als auch seitlich an den Stellen sein, an denen die Schmelze in die Zwischenräume eindringen konnte.



Abbildung 34: Mikroskopie 40x, Abplatzungen Mittellinie /Kontur keine Mikrorisse

Berücksichtigt man die Gründe für das Zustandekommen der in den Druckgusstests aufgetretenen vornehmlich mechanischen Schädigungen, wäre es denkbar, dass das für die bisher meisten genutzten Gussvorgänge (400 Vorgänge) verwendete Material FG 27 (Druckstück FG27-DR06-01) aus materialtechnischer Sichtweise für eine weitaus höhere Anzahl von Druckgussprozessen hätte verwendet werden können. Auch hier verbesserte sich die Oberflächenqualität durch die entstandene Oxidationsschicht im Gusskanal. (gemessene Rauigkeiten: $R_a = 1.93$, $R_z = 13,14$ im Gusskanal als auch rückseitig der Gussform keine Mikrorisse). Anhaftungen von oder Rückstände von Metallschmelze gab es keine an dem Druckstück.

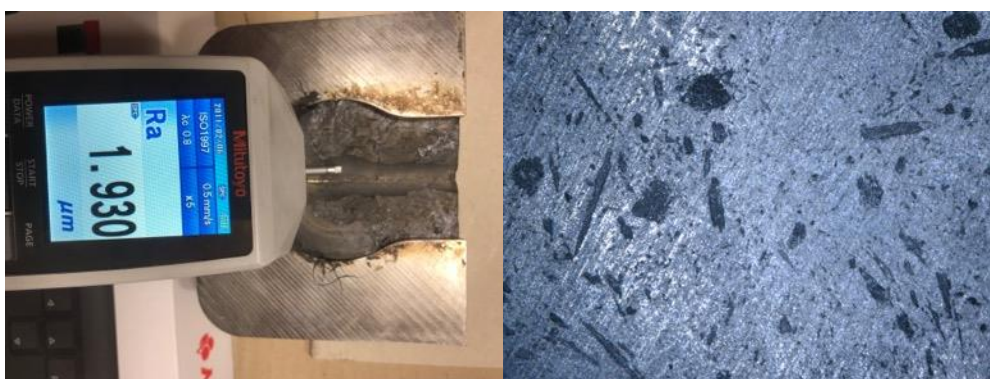


Abbildung 35: Messung der Rauigkeit im Gusskanal (links) Mikroskopie 40x Rückseite rissfrei (rechts)



Abbildung 36: Beschädigungen trotz Verklebung (links) und Hinterschnittpassung (rechts)

Neben der Fotodokumentation der Druckstückeinsätze wurden auch die Oberflächen der Angüsse dokumentiert, um den Einfluss der Keramik auf die Oberflächenbeschaffenheit späterer Gussteile zu untersuchen. Wie Abbildung 37 deutlich macht, zeigten die Oberflächen vor den Beschädigungen der Keramik keinerlei Auffälligkeiten. Nach den Beschädigungen spiegelten sich diese jedoch auch auf den Abgüssen wider.

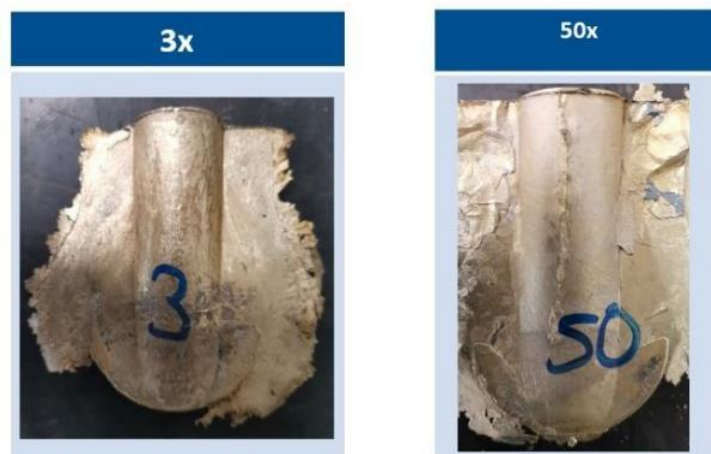


Abbildung 37: Vergleich der Abgüsse vor und nach Beschädigung

Eine mögliche Ursache für geringe Formstandzeiten der faserkeramischen Druckgusseinsätze sind schlagende Belastungen, die aufgrund des Gießkolbens entstehen. Um diese Belastungen zu vermeiden und gleichzeitig die Qualität der Gussteile zu garantieren, wurde die Idee validiert, eine Abbremsfunktion des Gießkolbens zu implementieren. Diese Abbremsung muss gezielt stattfinden, damit die Form vollständig gefüllt wird. Bei größeren Bauteilen stellte sich diese Abbremsung dank der längeren Formfüllzeit als praktikabel dar. Bei kleineren Bauteilen ist die Formfüllzeit jedoch viel kür-

zer, was die Abbremsung erschwert, da sie in einem kurzen Zeitfenster stattfinden muss. Anhand Abbildung 38 ist dies anhand von Graphen zu erkennen, wobei t_B das Zeitfenster für die Abbremsung darstellt.

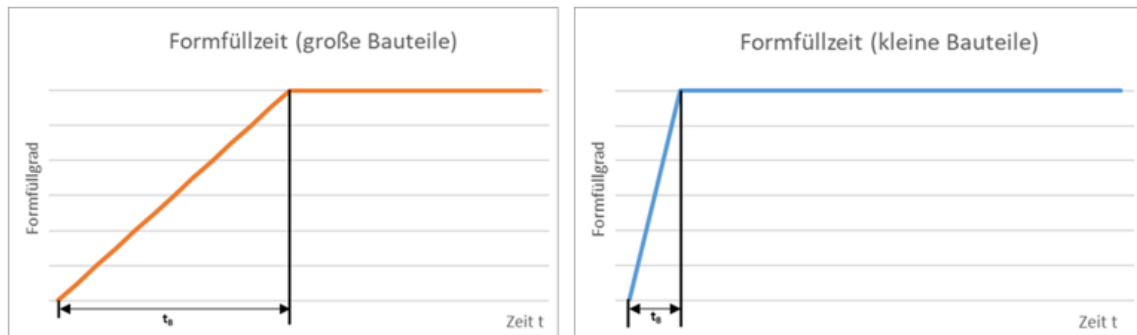


Abbildung 38: Vergleich der Formfüllzeiten bei kleinen und großen Bauteilen

Die Durchführung einer erfolgreichen Abbremsung stellt somit bei kleineren Bauteilen eine große Schwierigkeit dar. Neben der ohnehin schon schweren Parametrisierung der Bauteile spielen noch andere Faktoren, wie die Reaktionszeit der Maschine oder die Menge der manuell dosierten Schmelze, da diese ebenfalls das Zeitfenster beeinflussen, eine Rolle. Diese Faktoren machen es unmöglich, eine optimale Parametrisierung durchzuführen.



Abbildung 39: Gießsimulation großer Bauteile

Die Abbildung 39 zeigt zur Verdeutlichung die Gießsimulation eines großen Bauteils (Gewicht: 287g). Hier ist zu erkennen, dass zwischen den zwei dargestellten Zeitpunkten ein Fenster von ca. 20ms liegt. In dieser Zeitspanne sollte die Abbremsung des Gießkolbens erfolgen, um gleichzeitig die schlagende Belastung zu vermeiden und die Qualität der Gussteile zu garantieren. Dies wäre mit einer Parametrisierung theoretisch möglich und es wäre ein gewisses Spiel möglich.

Abbildung 40 hingegen zeigt die Gießsimulation kleinerer Bauteile (Gewicht: 26g) und wie klein das Zeitfenster bei diesen ist. Das Zeitfenster zur erfolgreichen Abbremsung liegt bei unter 1ms. Dies kann durch zusätzliche Variablen, wie die Füllmenge der Schmelze oder die Reaktionszeit der Maschine bis zur wirklichen Abbremsung bei so einer kurzen Zeit nicht mehr eingehalten werden.

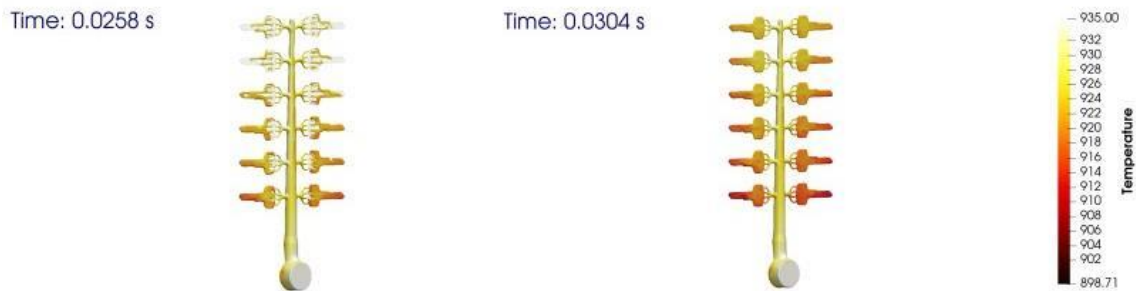


Abbildung 40: Gießsimulation kleiner Bauteile

2.10 Untersuchung von geeigneten Formschichten

Zur Auswahl einer geeigneter Formschichte, welche zu weniger Verschmutzungen und gleichzeitig zur Verhinderung anhaftender Materialien führen soll, wurden verschiedene Formschichten untersucht, wovon drei über eine Versuchsdokumentation vorgestellt werden. Darunter eine teure Bornitrid-Schichte, die bisher nicht gewerbsmäßig produziert wird, eine sogenannte Speiser-Iso-Schichte und das übliche verwendete Graphit. Zur Referenz wurde auch ein Versuch ohne Schichte durchgeführt.

Der Prüfstand besteht aus einer Gießkammer, einer Unterform und einer Rinne, in welche die Schmelze teilweise eingegossen wurde. Die Gießkammer und die Unterform wurden mit der jeweiligen Schichte dann besprüht. Der Aufbau kann der Abbildung 41 entnommen werden. Die Formschichte wurde jeweils auf die Gießkammer und die Unterform gesprüht.



Abbildung 41: Prüfstandsversuch für Bestimmung einer geeigneten Formschichte

Die nachfolgende Fotodokumentation zeigt die Ergebnisse der unterschiedlichen Schichten. Anhand dieser erkennt man, dass vor allem die Bornitrid-Schichte hinsichtlich Anhaftungen und Vorerstarrungen sehr gute Ergebnisse lieferte. Die derzeit genutzte Graphit-Schichte zeigte ebenfalls gute Ergebnisse. Die schlechtesten Ergebnisse erreichte die Steiger und Speiser-Iso-Schichte.

	Ohne Schichte	Steiger und Speiser-Iso-Schichte	Bornitrid	Graphit
Bilder der Abgüsse				
Bewertung	-	O	++	+

Abbildung 42: Bewertung der Formschichten

Nachdem die Bornitrid-Schichte in mehreren Tests die besten Ergebnisse erzielte, untersuchten weitere Versuche die Variation der Bornitrid-Schichte, um die Anhaftung zu optimieren. Eine solche Variation "M1" mit einem erhöhten Alkoholgehalt, erwies sich jedoch als weniger effektiv als die übliche Bornitrid-Schichte.

- starke Anhaftungen schon ab dem ersten Durchgang
- vorherige Schlichte zeigte bessere Ergebnisse (siehe Vergleichsbilder)



Abbildung 43: Vergleich von Variationen der Bornitrid-Schlichte

Der Vergleich zwischen der "M1"-Schlichte und der Bornitrid-Schlichte während eines Schlichteversuchs mit Dip-Proben wird in Abbildung 43 dargestellt. In diesem Experiment wurden verschiedene Schichten hinsichtlich Anhaftungen an der Faserkeramik untersucht. Es handelte sich hierbei um eine ähnliche Untersuchung wie bei den Dip-Versuchen, jedoch wurden in diesem Fall gleiches keramisches Material und unterschiedliche Schichten verwendet. Um die Schlichte für den Druckguss mit einer Sprühpistole verwenden zu können und in vorherigen Tests auftretende Abplatzungen der Schlichte zu vermeiden, wurde sie verdünnt. Nach einigen Tests stellte sich eine Verdünnung von 1:3 als optimal heraus, weshalb die Druckstückversuche mit der Bornitrid-Schlichte und einer Verdünnung von 1:3 durchgeführt wurden.

2.11 Durchführung von Tests & Validierung der Formstandzeit

Neben den Druckstück-Versuchen auf der horizontalen Druckgussmaschine, die in Kapitel 2.9 vorgestellt wurden, wurden auch Versuche mit den Prototypeinsätzen im vertikalen Druckguss durchgeführt, wie sie in Abbildung 3 dargestellt sind. Hierbei bestehen die Kavitäten der Gussteile aus Faserkeramik, was den Vorteil hat, dass der Einfluss des keramischen Materials auf die Qualität der Gussteile direkt untersucht werden kann. Die Ergebnisse dieser Versuche werden im Folgenden vorgestellt.

Bei den Versuchen konnten aufgrund eines speziellen Gießwerkzeuges einmal drei faserkeramischen Materialien ausgetestet werden. Ein Aufbau der Unter- und Oberform kann der Abbildung 44 entnommen werden. In der erkennt man, dass die Einsätze in das Gießwerkzeug mit einem Halter aus Warmarbeitsstahl montiert wurden.



Abbildung 44: Druckgusswerkzeug mit Einsätzen (links: Unterform, rechts: Oberform)

Ein Beispiel der Dokumentation der Prototypeinsätze (siehe Anhang L) zeigt, dass die Faserkeramiken auch beim horizontalen Druckguss nach nur fünf Schüssen stark beschädigt wurden und diese dann einen erheblichen Einfluss auf die Bauteile hatten, welcher in der Serienproduktion nicht verwendet werden können. Dies kann bei den Detailaufnahmen der Pressreste beobachtet werden. Bei diesem Versuch erreichten die Faserkeramiken insgesamt 18 Gießzyklen, bis alle Materialvariation deutlichen Beschädigungen an den Konturen aufzeigten und der Versuch somit abgebrochen werden musste. Im Hinblick auf die Schrägungen der Bauteile wurden interessante Erkenntnisse gewonnen. Es stellte sich heraus, dass Bauteile mit lediglich 1° Schrägungswinkel deutlich schneller beschädigt wurden als jene mit 2° und 5° . Dies zeigt, dass die Formschräge der Bauteile bei der Konstruktion der Faserkeramikeinsätze eine wichtige Rolle spielt und von den Produktionsstandards abweichen müsste.

Ergebnisse aus der Materialanalyse nach erfolgreichem Test:

ECM untersuchte nach dem Test auf der Prototyp-Gussanlage sowohl die keramische Form als auch die Gussteile.

Auffallend dabei war, dass nur mechanisch verursachte Risse an den Keramikeinsätzen aufzufinden waren. Die Analyse des Mikrogefüges mit dem Mikroskop und die Rissanalyse mittels Dye-Penetration-Test zeigten keine thermisch verursachten Risse. Was aufgrund der nachgewiesenen Thermoschockbeständigkeit des Materials nicht anders zu erwarten war. Ein mögliches Anhaften der Schmelze an der Keramikoberfläche ist eher unwahrscheinlich. Zu diesem Zweck wurden unter dem Mikroskop Keramikrückstände aus dem Guss-Baum entfernt und analysiert.



Abbildung 45: Prototyp-Gussform AS/DS nach dem Test mit Auswerfer



Abbildung 46: FG27, Mikroskopie (links) 100x Oberfläche Gussform, leichtes Ablösen, keine Anhaftung

Die Ursache für die Zerstörung der keramischen Prototyp-Einsätze lag vorwiegend in den unterschiedlichen Oberflächenqualitäten (siehe Anhang M) von Formteilen (erodiert) und den Gusskanälen (Sandgestrahlt). Trotz der realisierten Abformungsschrägen in der Keramikform kam es zu Hinterschnitten in der sandgestrahlten Oberfläche der Gusskanäle, an denen sich die Schmelze nach Abkühlung verhakte und die Keramik damit zwischen gegenüberliegenden Flächen oder Kanten einklemmte. Die Auswerfer für die Formteile verursachten anschließend eine für die Keramik unzulässige Zugbelastung die zu den massiven Schädigungen der Keramik führten.

Eine Untersuchung der Oberflächengüte (R_a und R_z) an der Keramikform als auch an den Gussteilen erhärtet die vorgenannte Theorie. Details dieser Analyse sind der Anlage M zu entnehmen.

R_a/R_z Mittelwerte der Guss-Kanal-Oberflächen (Keramik sandgestrahlt): **62.3 / 142 μm**

R_a/R_z Mittelwerte der Guss-Form-Oberflächen (Keramik erodiert): **1.66 / 9.96 μm**

Die Untersuchung der Oberflächenqualität an dem jeweils korrespondierenden Stellen an den Gussteilen ergab (über die Serien von den 18 Gussversuche hinaus) keine messbare Einbuße hinsichtlich der Oberflächenqualität. Vielmehr verbesserte sich die Oberfläche sogar durch eine die Keramik schützende Oxidationsoberfläche aus dem Prozess mit dem Benetzungsmittel (Bornitrid-Schlichte).



Abbildung 47: FG27, Mikroskopie (links) 100x Oberfläche Gussform, leichtes Ablösen, keine Anhaftung

Die muschelartigen Ausbrüche an der Keramikform bestätigten die Annahme, dass es beim Entformen zu den Schädigungen an der Keramikform kam.

Testproben mit Formschräge

Im Anschluss an die Gussversuche mit den Prototyp Einsätzen wurde zur Simulation des Kokillengusses, ein weiterer Versuch durchgeführt. Ziel des Versuchs war es, die Oberflächen und Kantenqualität zu beurteilen, wie sie sich nach dem Kontakt mit der Schmelze zeigt.

Die drei eingesetzten Materialvarianten wurden in Stab-Form (siehe Anhang N) mit drei unterschiedlichen Abformungswinkeln versehen und getestet. Der Versuchsablauf ähnelte den Dip-Tests. Hier wurde jedoch die Dip-Probe an eine Kokille befestigt, um auch den Erstarrungsprozess zu beobachten. Die Material- und Oberflächenanalyse an diese Tests zeigte keinerlei Probleme, d.h. keine Abbrüche oder Kantenschädigungen, keine Mikrorisse und keinerlei Anhaftungen von Material an den Testkörpern.

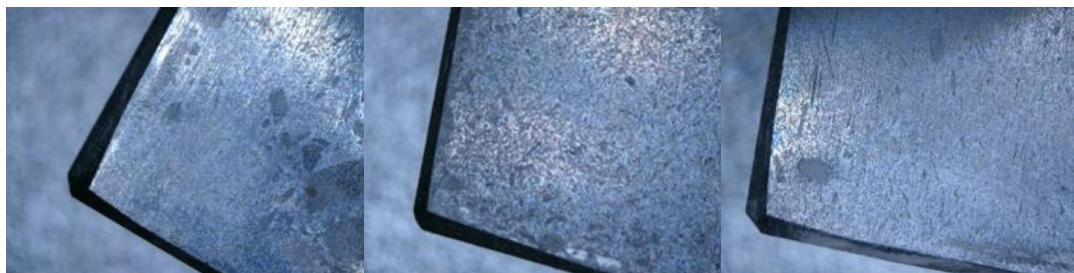


Abbildung 48: FG27.2, FG33, FG 35.2 Proben mit Abformungsschräge nach Gusstest

3. Fazit

Die Versuche im Rahmen des Projekts "DBU Faserkeramik" haben gezeigt, dass der Einsatz von Faserkeramik im Druckguss eine Herausforderung darstellt. Durch die Materialentwicklung konnte das faserkeramische Material an die Bedingungen des Druckgussprozesses angepasst werden und durch konstruktive und parametrische Optimierung des Druckgussprozesses konnten deutliche Verbesserungen bei den Formstandzeiten der Faserkeramik während des Projekts erzielt werden. Eine Optimierung der Gießparameter, um die mechanischen Belastungen auf die Faserkeramik zu reduzieren, kann aufgrund der in Kapitel 2.6 beschriebenen Problematik mit dem aktuellen Stand der Technik nicht vollständig umgesetzt werden, ohne die Qualität der Bauteile zu beeinträchtigen. Basis wäre ein automatisierter, reproduzierbarer Dosierprozess auf wenige Gramm genau, der aufgrund der hohen Gießtemperaturen mit bestehenden Technologien für Kupferschmelzen nicht entwickelt ist.

Trotz dessen zeigt sich weiterhin beim Druckguss das Potenzial der Faserkeramik aufgrund ihrer hohen thermischen Beständigkeit. Allerdings erfordert ihre Integration in den Druckgussprozess und Anpassung an die Druckgussanlagen komplexe Maßnahmen, die im Rahmen dieses Projekts aufgrund zeitlicher Einschränkungen nicht abgeschlossen werden konnten. Lösungsansätze wie die Beschichtung der Faserkeramik zur Bildung einer gleichmäßigen Oberflächenbeschaffenheit, die in Kapitel 2.4 erwähnt wurde, könnten eine wichtige Rolle bei der Validierung der Formstandzeiten spielen und müssten daher weiter untersucht werden.

Im Vergleich zu den bisher geringen Formstandzeiten im Druckguss, die durch viele Lösungsansätze maßgeblich gesteigert werden konnten, zeigte die Faserkeramik im Kokillenguss eine höhere mechanische Beständigkeit. Die Ergebnisse der Dip-Tests und weiteren Kokillenkernversuche zeigten, dass die Anwendung der Faserkeramik hier leichter möglich wäre, da keine hohen mechanischen Belastungen auftreten. Allerdings bedarf es weiterer, eingehender Untersuchungen. Da das Projekt hauptsächlich auf den Druckguss ausgerichtet war, dienten die Dip- und Kokillenversuche lediglich als erster Validierungsschritt für die Materialien. Dabei wurden die Gießzyklen in der Regel auf zehn begrenzt, was zu niedrig ist, um eine Aussage über die tatsächliche Formstandzeit der Faserkeramik im Kokillenguss zu treffen.

Basierend auf den Erfahrungen aus dem Projekt könnte in Zukunft die Verwendung von Faserkeramik als Gussform oder Gießkern im Kokillenguss in Betracht gezogen werden. Hohes Potential bieten das geringere Materialgewicht und damit eine physische Entlastung des Werkers. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Einfluss des Gießmaterials auf die thermischen Belastungen von Kokillen oder Kernen. Unterschiedliche Gießtemperaturen können die Belastungen beeinflussen, wodurch das Potenzial von Faserkeramik insbesondere mit steigender Gießtemperatur exponentiell zunimmt. Zukünftige Forschungsprojekte werden sich auf die Untersuchung von Gießmaterialien mit deutlich höheren Gießtemperaturen konzentrieren. Bei diesen Temperaturen ist die Verwendung von höchstlegierten Warmarbeitsstählen unwirtschaftlich. Hier eröffnet die Verwendung von Faserkeramik aufgrund ihrer hohen thermischen Beständigkeit neue Möglichkeiten. So könnte die Herstellung bestimmter Gusswerkstoffe erst ermöglicht werden. Insbesondere bei der Verwendung von Reinkupfer als Gießmaterial könnte Faserkeramik durch dessen chemische Beständigkeit gegenüber Kupfer in Zukunft von großer Bedeutung sein. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit bedarf es eingehender, weiterführender Untersuchungen zur Lebensdauer der Materialien im Kokillenguss.

Ein weiteres potenzielles Anwendungsgebiet wäre die Verwendung der Faserkeramik in Gießlöffeln. Der Gießlöffel muss in der Lage sein, das flüssige Metall für eine bestimmte Zeit zu halten, bevor es in die Gießform gegossen wird. Während dieser Zeit kann das flüssige Metall den Gießlöffel erheblich erwärmen, während die Schmelze selbst abkühlt, was zu einer Verschlechterung der Gießqualität und sogar zu einer Verformung des Gießlöffels führen kann. Faserkeramik kann hier verwendet werden, um die Lebensdauer des Gießlöffels zu verbessern. Durch ein Vorwärmen des Gießlöffels kann auch die hohe Wärmeleitfähigkeit der Faserkeramik umgangen werden, um eine gleichmäßige Gießtemperatur aufrechtzuerhalten und somit eine gleichmäßige Gießqualität zu gewährleisten. Ein solcher Gießlöffel kann vor allem im aktuellen Forschungsprojekt „HiroCast“ zur Automatisierung des Druckgussprozesses eine große Rolle spielen.

In einem vergangenen Projekt der Breuckmann GmbH & Co.KG wurde ebenfalls versucht, den Automatisierungsgrad und die Prozessstabilität in der Gießindustrie durch den Einsatz eines Dosiersystems von Meltec zu erhöhen. Allerdings war das für das Dosiersystem verwendete Material sehr anfällig für den Thermoschock, der beim Eintauchen in die Schmelze auftritt. Ebenfalls nachteilig war die Benetzbarkeit, die zu An-

haftungen und letztendliche „Verstopfung“ des Dosiersystems führte. Die entwickelte Faserkeramik erwies sich als thermoschockbeständig und könnte bei Meltecs Dosiersystemen, ggf. zusammen mit der Bornitrid-Schlichte, um die Benetzbarkeit noch weiter zu reduzieren, zu enormen Sicherheitsvorteilen beitragen. Hier spielen jedoch wieder Kostenfaktor und die spezielle Handhabung der Faserkeramik aufgrund ihrer Stoßempfindlichkeit eine Rolle, was mit weiteren Versuchen untersucht werden muss.

Des Weiteren kann Faserkeramik auch bei einem weiteren Projekt seitens Breuckmann im Rahmen der Optimierung des Niederdruckgussverfahren als Material für das Steigrohr eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Temperaturbeständigkeit und des chemisch passiven Verhaltens der Faserkeramik kann einerseits die Lebensdauer des Steigrohrs erhöht werden und andererseits der Prozess erst technisch ermöglicht werden.

Durch dieses Forschungsprojekt wurde deutlich, wie hoch die Potentiale dieser CMC-Werkstoffgruppe sind. Die hohe thermische Beständigkeit der Faserkeramik, die geringe Benetzbarkeit für Kupferschmelzen, die Quasiduktilität, die geringere Dichte und die Thermoschockbeständigkeit ermöglichen viele weitere Anwendungen in der Gießindustrie. Durch weitere gezielte Untersuchungen in Forschungsprojekten kann ihre Anwendbarkeit in den verschiedenen genannten Bereichen validiert werden.

Unter der Berücksichtigung, dass zum Projektbeginn kein verfügbares Faserkeramik-Material für die untersuchten Anwendungen im Druck- und Kokillenguss existierte, wurden hier in der Materialentwicklung bedeutende Fortschritte erzielt, Meilensteine realisiert und folgende Ziele umgesetzt bzw. erreicht:

- Generierung eines SI-infiltrationsfähigen Materials zur Realisierung von dickwandigen bzw. massiven Druckgussformen
- adäquat für den Druckgussprozess: ca. 110 MPa bei vergleichsweise hoher Duktilität, E-Modul ca. 90 GPa (zum Vergleich HB-Cesic®, E-Modul = 350 GPa)
- Implementierung einer, unter in Kontakt mit der Metallschmelze (Sitomb®) 1000°C geprüften, Thermoschockfestigkeit
- partielle Rückführung von recycelbaren Komponenten aus dem Produktionsprozess in die gefundene Materiallösung (ca. 5% des Faseranteils)
- Generierung von Oberflächen mit einer Rauigkeit $R_a < 2\mu\text{m}$ an Keramikform und Gussteil (Einsatz einer von ECM entwickelten BN-Schlichte)

- Identifizierung/Steuerungsmöglichkeit der durch die Materialkomposition gegebenen Einflussfaktoren (auf das Mikrogefüge als auch auf Materialkennwerte) für die Anwendung im Druckgussverfahren.
- Parametrisierung von Materialeigenschaften zur Ermöglichung von lokalen „tailor made solutions“ in den Gussprozessen
- Evaluierung von hybriden Materiallösungen im Metallguss Prozess
- Untersuchungen zur Verwendung von Beschichtungen (SiC, ZrO₂) auf den für dieses Projekt priorisierten FG-Materialvarianten.

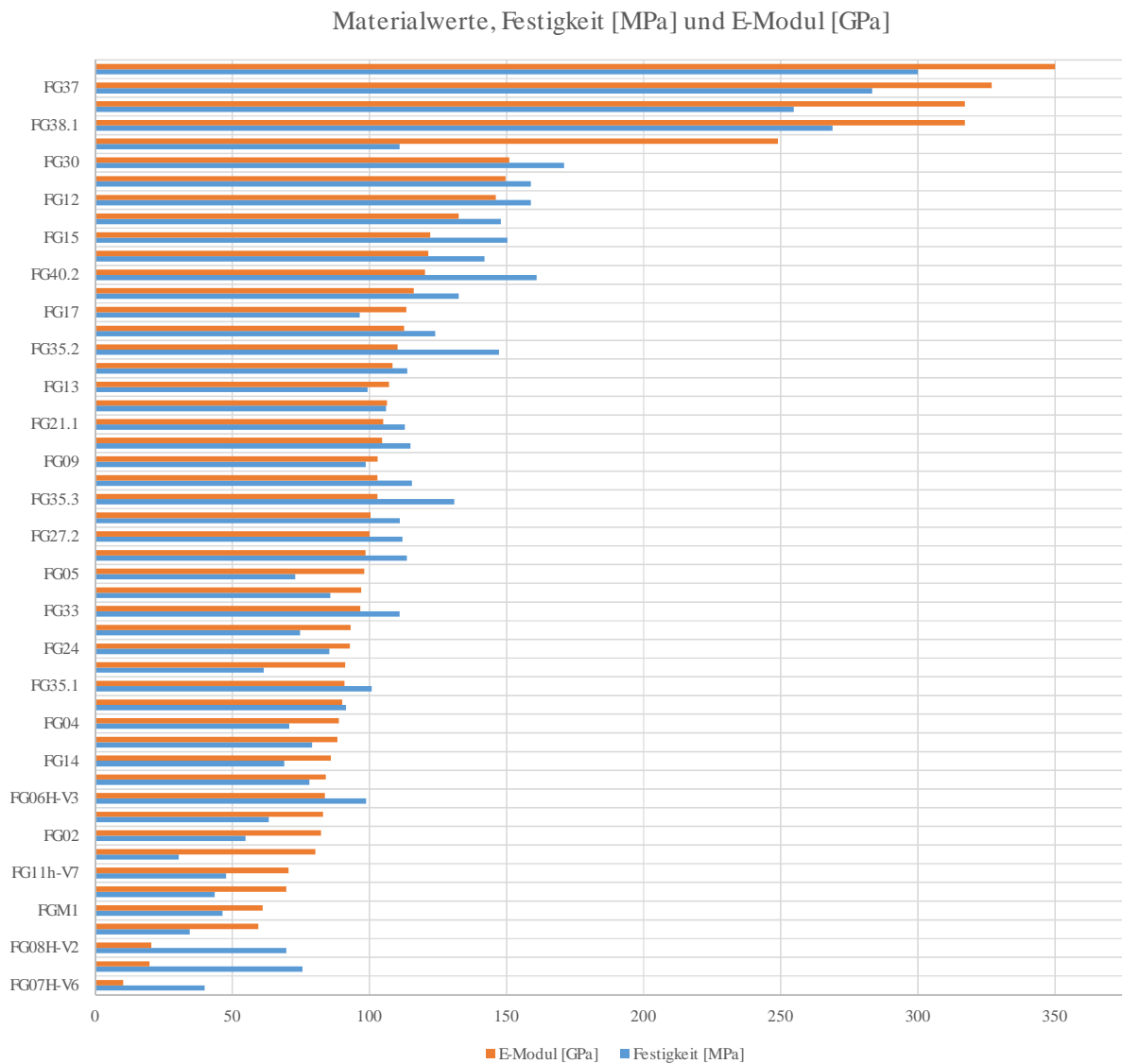
Das Thema Beschichtung konnte in diesem bisherigen Vorhaben nur ansatzweise bearbeitet werden. Dennoch zeigte sich, dass dem Einfluss von Beschichtungen und/oder Schichten in den Gussverfahren größte Aufmerksamkeit zu widmen ist, weshalb sich daraus ein bedeutender Ansatzpunkt für ein Folgeprojekt ableiten lässt.

Für die ECM GmbH hat das Projekt einen exemplarischen Charakter, da sich auch aus der Sichtweise der Materialentwicklung eine Reihe weiterer Verwertungsmöglichkeiten der Materialien ergeben. Das Material-Portfolio konnte damit erweitert werden und versetzt ECM zukünftig in die Lage auch anderen Industriekunden zugeschnittene Materiallösungen für Hochtemperaturanwendungen anzubieten. Anfragen aus der Raumfahrt, z.B. für Raketenantriebe, zur Steuerung von Satellitenpositionen müssten damit in Zukunft nicht mehr von vornherein abgelehnt werden. Mit energie- und ressourcensparenden „tailor-made-solutions“ für thermoschockbeständiges Material kann ECM neue Märkte in Luft- und Raumfahrt (z.B. Sensorik, Antriebe) aber auch anderen Industriebereichen (z.B. Pumpen- und Turbinentechnik, ...) erschließen.

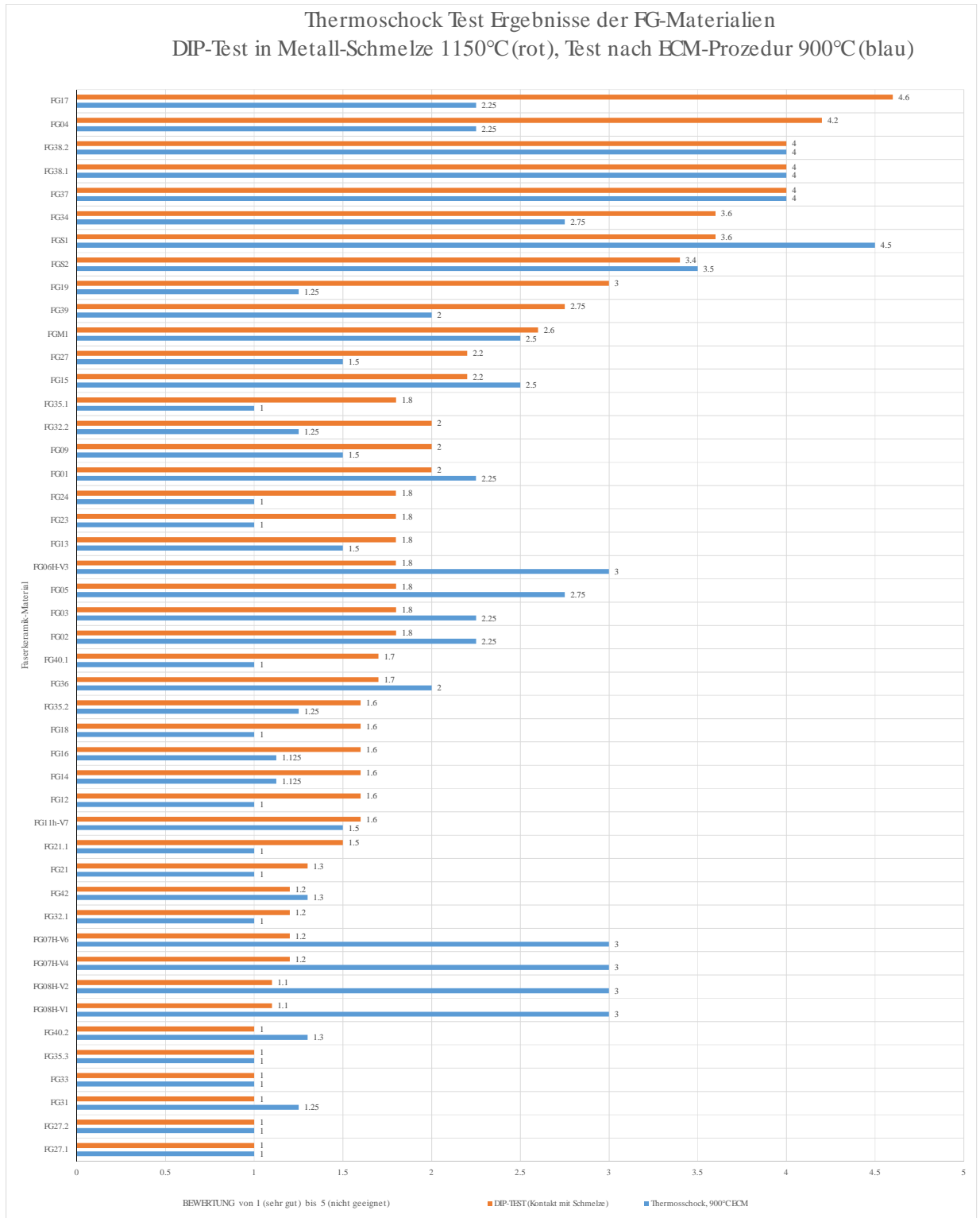
Literaturverzeichnis

- [NH14] NAIMI, S. und HOSSEINI, S. M.:
Tool Steels in Die-Casting Utilization and Increased Mold Life. In: Advances in Mechanical Engineering. Hindawi Publishing Corporation, 2014.
- [KSG07] KONG, L.X., SHE, F.H., GAO, W.M., NAHAVANDI, S. und HODGSON P.D.:
Integrated optimization system for high pressure die casting processes. *Journal of Materials Processing Technology* 201, 2007, S.629-634.
- [Sri12] SRINIVASAN M.:
Science and Technology of Casting Processes, BOD – Books on Demand, 2012.
- [MJS16] MEHRABI J., JOLLY M. und SALONITIS K.:
Sustainable Investment Casting, University of Sunderland, 2016.

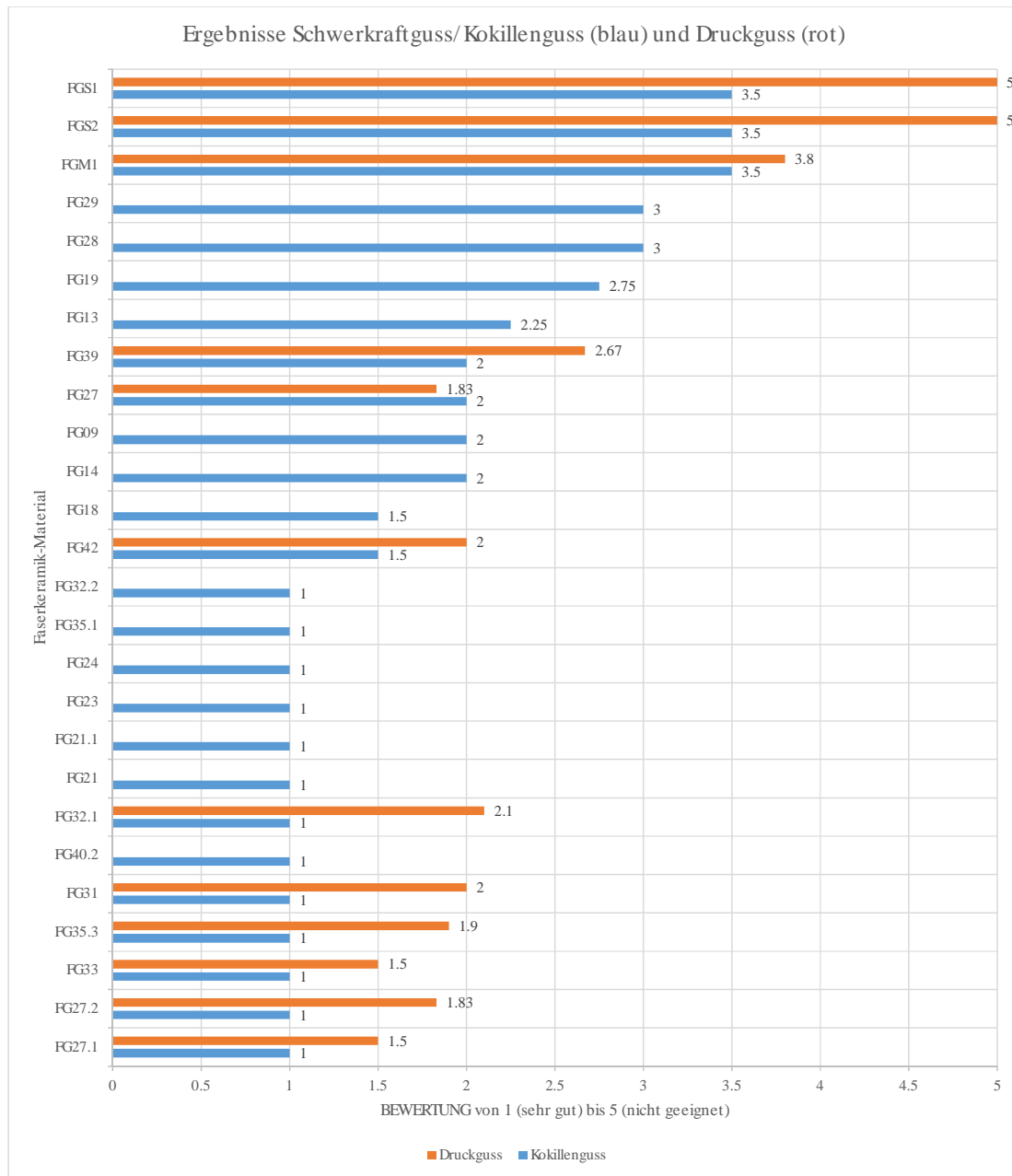
Anhang B: Ergebnisse der Bewertung der FG-Materialien (hier Festigkeit [MPa] und E-Modul [GPa])



Anhang C: Ergebnisse der Bewertung der FG-Materialien aus den Thermoschocktests

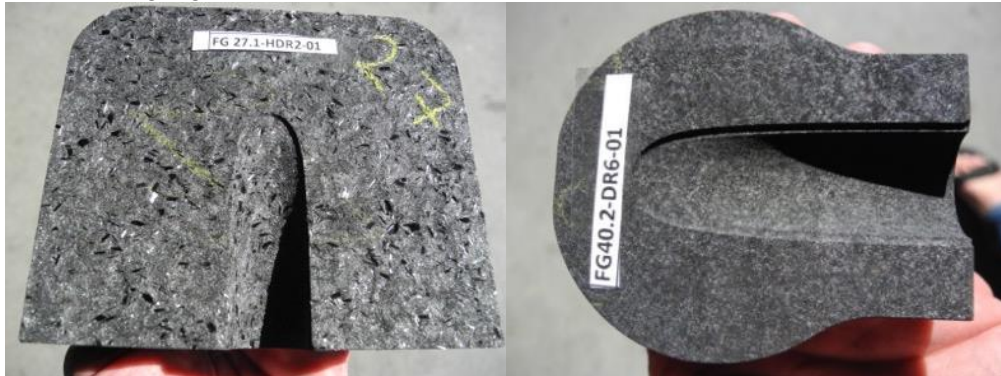


Anhang D: Ergebnisse der Bewertung der FG-Materialien aus den Gusstests (Schwerkraftguss/Kokillenguss und Druckguss)



Anhang E: Beispiele zur Umsetzung der Demonstrator Pressformen

Fertigung von Demonstrator-Pressformen aus den Rohmaterialblöcken



Demonstrator Pressformen aus Rohmaterialblöcken (mit Aufmaß für die Endbearbeitung)

Infiltration der Pressform-Grünbauteile mit Silizium



Infiltration der Pressform-Grünbauteile (Anbieten von polykristallinem Si zur Infiltration)

Nachbearbeitung der produzierten keramischen Demonstratoren



Prototyp-Gussform AS/DS nach Infiltration, Sandstrahlen und Schleifen (vor dem Erodieren)

Anhang F: Versuchsplan der Dip-Tests



Anhang G: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien

als wichtiger	Oberflächenqualität	Maßhaltigkeit	Abtragungsgeschwindigkeit	Verschleiß des Werkzeugs	Summe
Oberflächenqualität		2	2	2	6
Maßhaltigkeit	0		2	2	4
Abtragungsgeschwindigkeit	0	0		1	1
Verschleiß des Werkzeugs	0	0	1		1
Gewichtung	50%	33,33%	8,33%	8,33%	

Anhang H: Beispielhaftes Maßprüfprotokoll für Drahterodieren



Produktbezogene Prüfergebnisse

Stand: 1 Datum: 28.07.2022 Blatt: 1/1

Dokument-Bez.: Drahterodieren - Faserkeramik

<input checked="" type="checkbox"/> 1.1 Geometrie, Maßprüfung	<input type="checkbox"/> 1.9 ESD - Prüfung
<input type="checkbox"/> 1.2 Funktionsprüfung	<input type="checkbox"/> 1.10 Zuverlässigkeitsprüfungen
<input type="checkbox"/> 1.3 Werkstoffprüfung	<input type="checkbox"/> 2 Muster
<input type="checkbox"/> 1.4 Haptikprüfung	<input type="checkbox"/> 3 Technische Spezifikation
<input type="checkbox"/> 1.5 Akustikprüfung	<input type="checkbox"/> 4 Produkt-FMEA
<input type="checkbox"/> 1.6 Geruchsprüfung	<input type="checkbox"/> 5 Konstruktionsfreigabe
<input type="checkbox"/> 1.7 Aussehensprüfung	<input type="checkbox"/> 6 Einhaltung gesetzlicher Forderungen
<input type="checkbox"/> 1.8 Oberflächenprüfung	<input type="checkbox"/> 7 Materialdatenblatt/IMDS

Lieferant / Produktionsstandort: Breuckmann GmbH & Co. KG	
Auftragsnummer: 133750	
Benennung: Drahterodieren - Faserkeramik	
Werkzeug-Nr.: für 000-20	
Datum: 28.07.2022	

Ref. Nr.:	Forderungen Spezifikation	IST-Werte Lieferant	Spezifikation erfüllt		Bemerkung
			Ja	Nein	
1	Länge 76 ± 0,1	76.01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		76.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		75.99	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		76.01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		76.01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		76.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	25 ± 0,01	25.01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		25.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		24.99	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		25.01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		24.99	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		24.99	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Durchmesser Ø6	6.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		6.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		6.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		6.02	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		6.01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		6.01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	Länge 64 ± 0,1	64.02	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		64.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		63.99	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		64.01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		64.02	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		64.02	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Bemerkungen:
 - ausgezeichnete Maßhaltigkeit bei der Bearbeitung der Außenkonturen der Druckstückeinsätze

Name: Sarialtin, Dogan
 Abteilung: F&E
 Telefon: -
 Fax: -
 E-Mail: Entwicklung@breuckmann.de
 Datum: 28.07.22

Anhang I: Beispielhaftes Maßprüfprotokoll für Fräsen



Produktbezogene Prüfergebnisse

Stand: 1 Datum: 29.07.2022 Blatt: 1/1

Dokument-Bez.: Fräsen - Faserkeramik

<input checked="" type="checkbox"/> 1.1 Geometrie, Maßprüfung	<input type="checkbox"/> 1.9 ESD - Prüfung
<input type="checkbox"/> 1.2 Funktionsprüfung	<input type="checkbox"/> 1.10 Zuverlässigkeitsprüfungen
<input type="checkbox"/> 1.3 Werkstoffprüfung	<input type="checkbox"/> 2 Muster
<input type="checkbox"/> 1.4 Haptikprüfung	<input type="checkbox"/> 3 Technische Spezifikation
<input type="checkbox"/> 1.5 Akustikprüfung	<input type="checkbox"/> 4 Produkt-FMEA
<input type="checkbox"/> 1.6 Geruchsprüfung	<input type="checkbox"/> 5 Konstruktionsfreigabe
<input type="checkbox"/> 1.7 Aussehensprüfung	<input type="checkbox"/> 6 Einhaltung gesetzlicher Forderungen
<input type="checkbox"/> 1.8 Oberflächenprüfung	<input type="checkbox"/> 7 Materialdatenblatt/IMDS

Lieferant / Produktionsstandort: Breuckmann GmbH & Co. KG
Auftragsnummer: 133750
Benennung: Fräsen - Faserkeramik
Werkzeug-Nr.: für 000-20
Datum: 29.07.2022

Ref. Nr.:	Forderungen Spezifikation	IST-Werte Lieferant	Spezifikation erfüllt		Bemerkung
			Ja	Nein	
1	Länge 76 ± 0,1	76.14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Diamant
		75.9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diamant
		75.89	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Hartmetall
		75.93	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hartmetall
		76.21	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Sondergüten
		75.88	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Sondergüten
2	Länge 25 ± 0,01	25.09	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diamant
		25.21	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Diamant
		24.95	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hartmetall
		25.17	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Hartmetall
		24.9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sondergüten
		25.26	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Sondergüten
3	Durchmesser ø6	6.1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diamant
		5.88	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Diamant
		6.02	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hartmetall
		5.99	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Hartmetall
		6.13	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Sondergüten
		5.91	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sondergüten
4	Länge 64 ± 0,1	64.22	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Diamant
		63.9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Diamant
		63.87	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Hartmetall
		63.79	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Hartmetall
		64.12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Sondergüten
		63.88	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Sondergüten

Bemerkungen:
 - bei allen Druckstücke leichte/schwere Beschädigungen aufgrund der Wärmeentwicklung des Werkzeugs, somit keine umsetzbare Alternative

Name: Sarialtin, Dogan
 Abteilung: F&E
 Telefon: -
 Fax: -
 E-Mail: Entwicklung@breuckmann.de
 Datum: 29.07.22

Anhang J: Beispielhaftes Maßprüfprotokoll für Senkerodieren



Produktbezogene Prüfergebnisse

Stand: 1 Datum: 28.07.2022 Blatt: 1/1

Dokument-Bez.: Senkerodieren - Faserkeramik

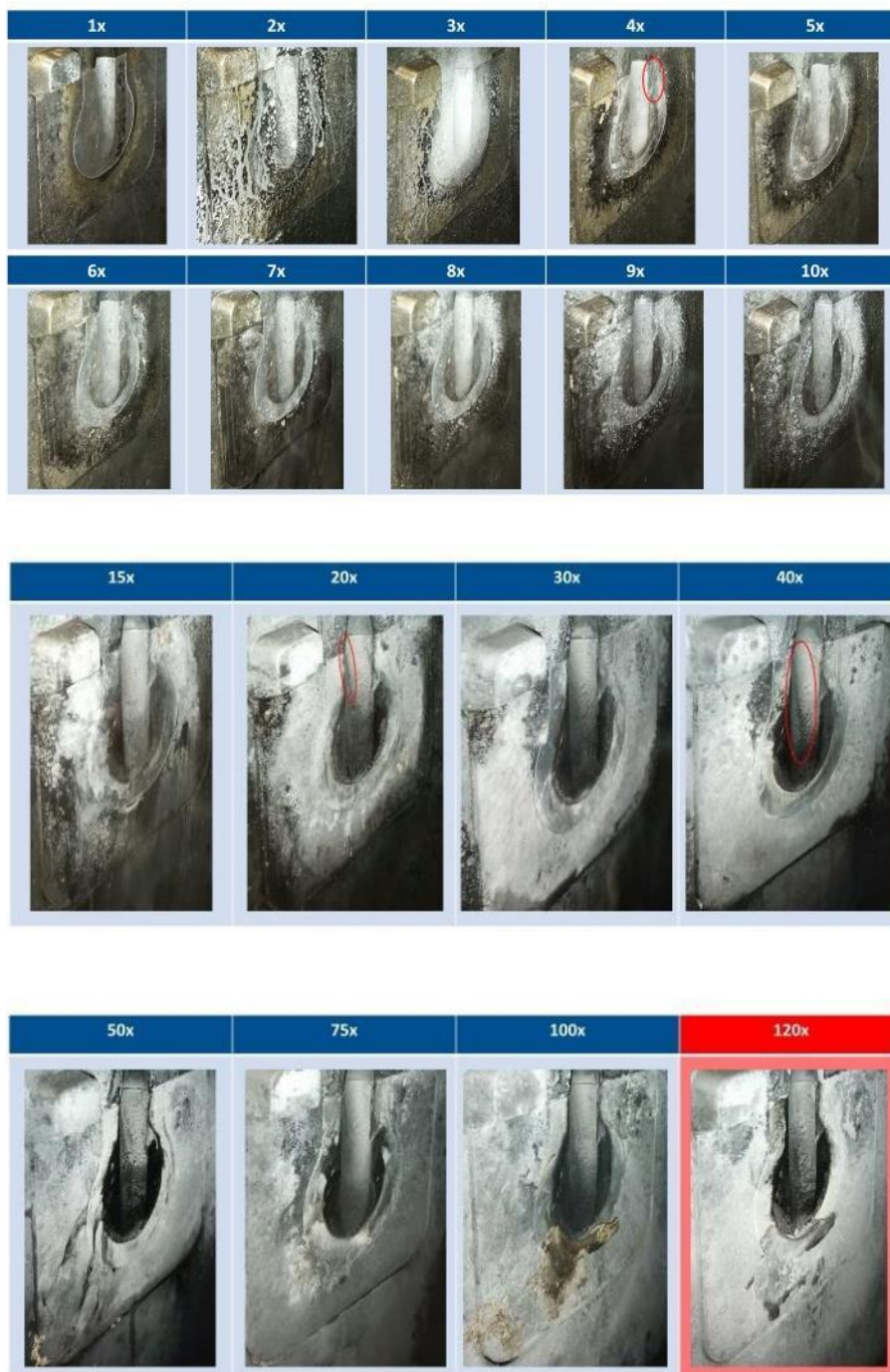
<input checked="" type="checkbox"/> 1.1 Geometrie, Maßprüfung	<input type="checkbox"/> 1.9 ESD - Prüfung
<input type="checkbox"/> 1.2 Funktionsprüfung	<input type="checkbox"/> 1.10 Zuverlässigkeitsprüfungen
<input type="checkbox"/> 1.3 Werkstoffprüfung	<input type="checkbox"/> 2 Muster
<input type="checkbox"/> 1.4 Haptikprüfung	<input type="checkbox"/> 3 Technische Spezifikation
<input type="checkbox"/> 1.5 Akustikprüfung	<input type="checkbox"/> 4 Produkt-FMEA
<input type="checkbox"/> 1.6 Geruchsprüfung	<input type="checkbox"/> 5 Konstruktionsfreigabe
<input type="checkbox"/> 1.7 Aussehensprüfung	<input type="checkbox"/> 6 Einhaltung gesetzlicher Forderungen
<input type="checkbox"/> 1.8 Oberflächenprüfung	<input type="checkbox"/> 7 Materialdatenblatt/IMDS

Lieferant / Produktionsstandort: Breuckmann GmbH & Co. KG	
Auftragsnummer: 133750	
Benennung: Senkerodieren - Faserkeramik	
Werkzeug-Nr.: für 000-20	
Datum: 28.07.2022	

Ref. Nr.:	Forderungen Spezifikation	IST-Werte Lieferant	Spezifikation erfüllt		Bemerkung
			Ja	Nein	
1	Länge 76 ± 0,1	76.23	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Kupfer
		75.81	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Kupfer
		76.02	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wolframkupfer
		75.91	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wolframkupfer
		75.89	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Graphit
		76.13	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Graphit
2	Länge 25 ± 0,01	25.12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Kupfer
		25.24	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Kupfer
		24.95	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wolframkupfer
		25.08	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wolframkupfer
		24.89	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Graphit
		25.00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Graphit
3	Durchmesser Ø6	6.23	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Kupfer
		5.82	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Kupfer
		6.04	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wolframkupfer
		6.09	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wolframkupfer
		6.13	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Graphit
		5.91	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Graphit
4	Länge 64 ± 0,1	64.18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Kupfer
		63.79	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Kupfer
		63.96	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wolframkupfer
		64.03	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wolframkupfer
		64.04	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Graphit
		63.97	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Graphit

Bemerkungen: - ausreichende Maßhaltigkeit bei der Bearbeitung für die Innenkonturen der Druckstückeinsätze durch die Wolframkupferelektrode - Kupfer und Graphit keine gute Maßhaltigkeit
Name: Sarialtin, Dogan Abteilung: F&E Telefon: - Fax: - E-Mail: Entwicklung@breuckmann.de Datum: 28.07.22

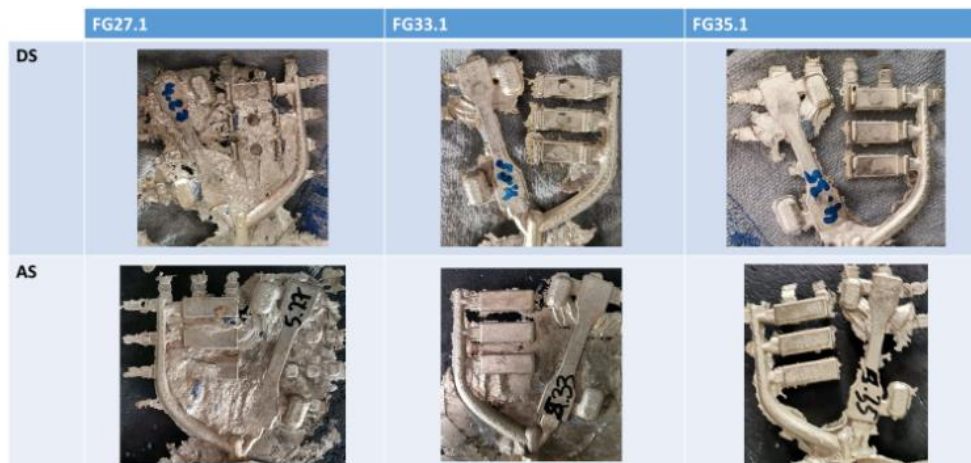
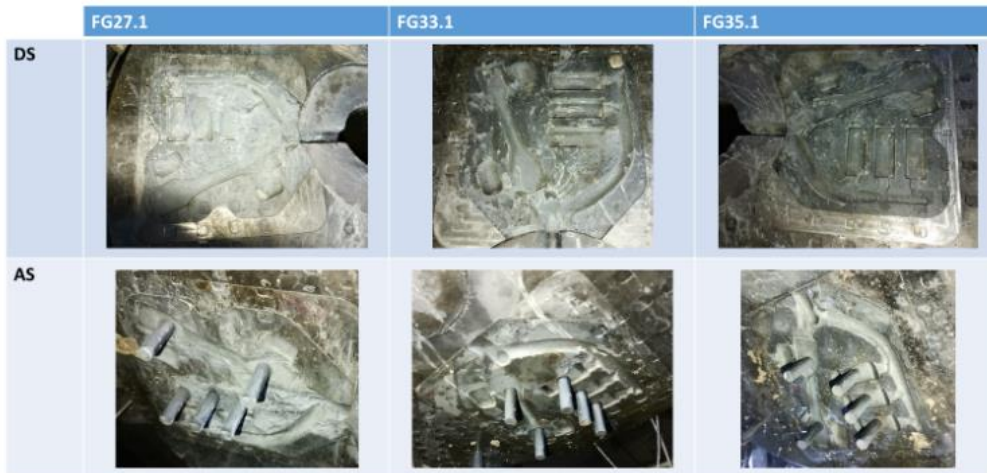
Anhang K: Exemplarische Fotodokumentation eines Druckstückversuchs



- nach dem 4. Schuss Kante auf der rechten Seite leicht abgebrochen
- nach 20 Schuss erste Risserscheinung am Gießkanal, die sich im Verlauf des Versuchs immer weiter ausbreitet
- nach 120 Schuss → Druckstück war in einem mittelmäßigen, aber für den Druckguss unbrauchbaren Zustand

Anhang L: Auszug aus der Fotodokumentation der Prototypeinsätze (beim fünften und 18. Guss)

Bilder-Prototypeinsätze (5. Guss) - Detailaufnahmen



Bilder-Prototypeinsätze (18. Guss) - Detailaufnahmen



	FG27.1	FG33.1	FG35.1
DS			
AS			

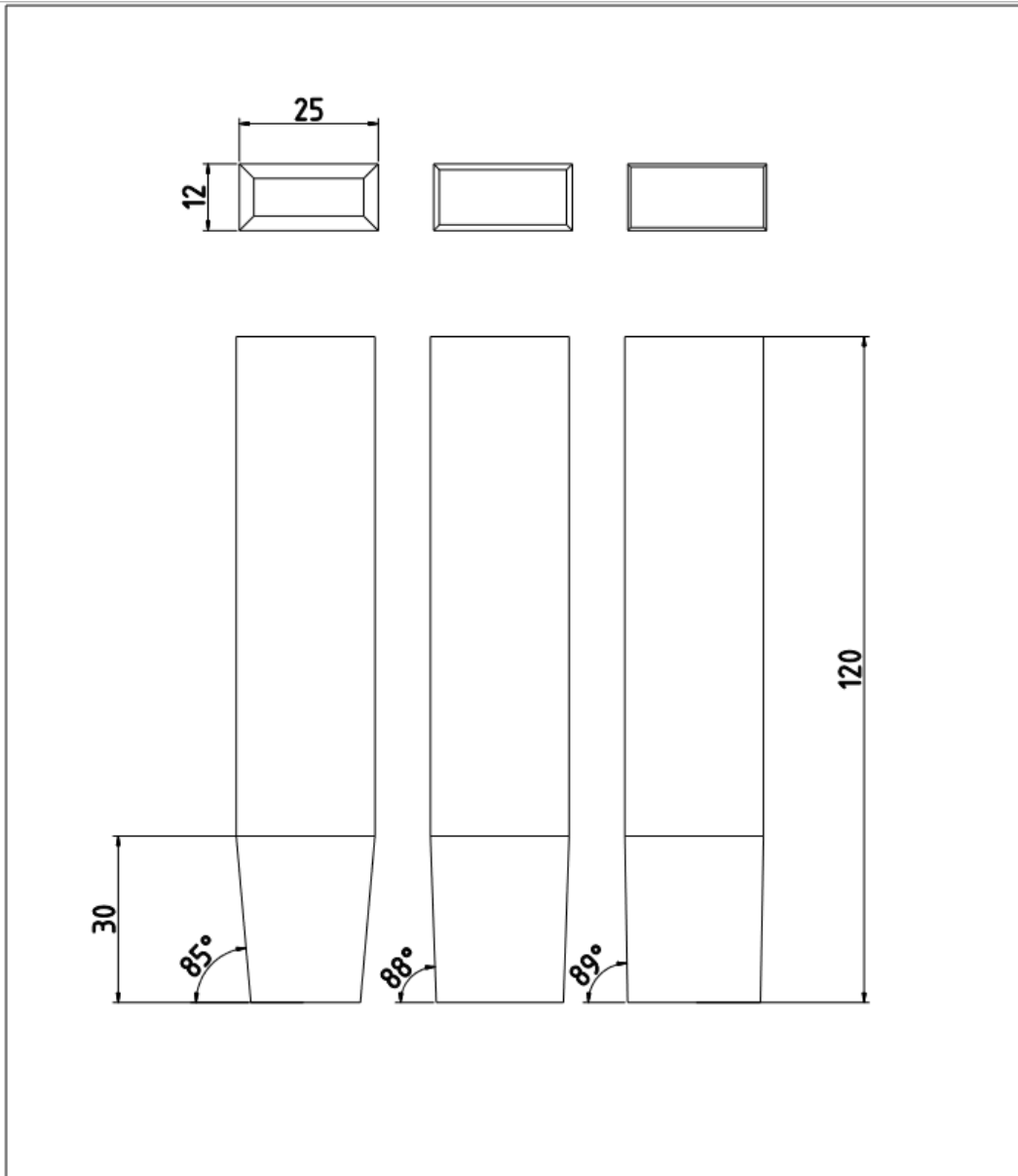
Anhang M: Übersicht der Rauigkeiten an Keramik und Guss Teil (R_a und R_z) vor, während und nach insgesamt 18 Gusszyklen

R_a - Keramik Gussform, AS				R_a - Guss Teile, AS			
R_a	FG 27	FG 33	FG35	R_a	FG 27	FG 33	FG 35
erodierte Formflächen	2-5	2-5	2-5	3.Guss	1.722	1.622	1.260
18.Guss Formflächen	2.035	1.626	1.721	5.Guss	1.731	1.523	1.646
Kanäle sandgestrahlt	80-200	80-200	80-200	10.Guss	1.584	1.582	1.272
18.Guss Oberfläche Kanäle	62	58	67	18.Guss	1.582	1.602	1.747
R_z - Keramik Gussform, AS				R_z - Guss Teile, AS			
R_z	FG 27	FG 33	FG35	R_z	FG 27	FG 33	FG 35
erodierte Formflächen	5-10	5-10	5-10	3.Guss	10.431	9.739	8.274
18.Guss Formflächen	12.635	10.726	11.721	5.Guss	9.865	10.008	11.269

Kanäle sandge- strahlt	100-400	100-400	100-400		10.Guss	10.004	9.423	9.426
18. Guss Oberflä- chen Kanäle	124	133	169		18.Guss	10.884	9.003	11.181

Anhang N: Testproben mit Formschräge

Für diese Unterlagen behalten wir uns alle Rechte vor. Sie dürfen ohne unsere schriftliche Zustimmung weder vervielfältigt, noch sonst wie benutzt, noch Dritten zugänglich gemacht werden!



Für alle nicht tolerierten Geometrien im Formnest gilt eine Toleranz von $\pm 0.02 \text{ mm}$!

Fehlende Maße sind dem Datensatz zu entnehmen!

Nur zur Information
Unterliegt nicht dem Änderungsdienst

				Name/NAME	mlaufmann											
				Datum/DATE	14.11.2022											
Index INDEX	Änderung.Nr. MODIFIC.NO.	Datum DATE	Name NAME	geprüft	siehe CAD-Prüfblatt											
Menge/ Quantity	1			Allgemeintoleranzen	<table border="1"> <tr><td>+0.1/-0.1</td><td>0-6mm</td></tr> <tr><td>+0.2/-0.2</td><td>6-30mm</td></tr> <tr><td>+0.3/-0.3</td><td>30-120mm</td></tr> <tr><td>+0.5/-0.5</td><td>120-400mm</td></tr> <tr><td>+0.8/-0.8</td><td>400-1000mm</td></tr> </table>		+0.1/-0.1	0-6mm	+0.2/-0.2	6-30mm	+0.3/-0.3	30-120mm	+0.5/-0.5	120-400mm	+0.8/-0.8	400-1000mm
+0.1/-0.1	0-6mm															
+0.2/-0.2	6-30mm															
+0.3/-0.3	30-120mm															
+0.5/-0.5	120-400mm															
+0.8/-0.8	400-1000mm															
Format/ SIZE	A4		Maßstab 1:1	General Tolerances	DIN 2768 / mittel											
Werkstoff/ MATERIAL	// //				Auftragsnr. / Orderno. <Abfrage_8>											
Kunde-Artikelname / Customer-Product Name				Werkzeugnummer / Toolnumber	Blatt-/Modellbezeichnung - Page/Modelname											
Dipp-Proben mit Entformung				<Abfrage_7>	Blatt1											
//																
wzb:\																

