

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Flächige Stahl-Keramik-Verbundbauteile mit integrierten Kavitäten auf Basis von Grünfolien und deren quantifizierbare Bewertung der Verarbeitbarkeit

der Forschungsstelle(n)

Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Das IGF-Vorhaben 17839 BG der Forschungsvereinigung Deutsche Keramische Gesellschaft e.V. (DKG) wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dresden, 30.09.2015

Ort, Datum

Teschke T. Klein

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema	4
2	Motivation des Forschungsprojektes (wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung)	4
2.1	Anlass für den Forschungsantrag	4
2.2	Stand der Forschung	4
2.2.1	Additive Fertigung	5
2.2.2	Zwei-Komponenten-Spritzguss und Einlege-Spritzgießen	5
2.2.3	Mehrschichtige Metall-Keramik-Bauteile basierend auf Grünfolien	6
2.2.4	Herstellung von Werkstoffverbundfolien	6
2.2.5	Strukturierung im Grünzustand	7
2.2.6	Prägen	8
2.2.7	Tiefziehen	9
2.3	Branchenübergreifende Zusammenarbeit und eigene Vorarbeiten	10
3	Forschungsziele	20
3.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	20
3.1.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	21
3.2	Innovativer Beitrag der erarbeiteten Forschungsergebnisse	22
4	Forschungsergebnisse	24
4.1	Arbeitspaket 1: Herstellung und Optimierung von Einzelkomponentenfolien für umformende und strukturierende Bearbeitungsprozesse	24
4.1.1	Faktoren zur Beeinflussung von Grünfolieneigenschaften	24
4.1.2	Materialauswahl	25
4.1.3	Materialkombinationen zur Herstellung eigenschaftsangepasster Grünfolien	27
4.1.4	Pulvercharakterisierung	29
4.1.5	Schlicker- und Folienherstellung	30
4.1.6	Einfluss der Lagerbedingungen	33
4.2	Arbeitspaket 2: Entwicklung von quantifizierbaren Bewertungsmethoden für die Bearbeitbarkeit von Grünfolien	34
4.2.1	Detact – Datenmanagement und statistische Auswertungen	36
4.2.2	Charakterisierungsmethoden	38
4.2.3	Lagerbedingungen	53
4.2.4	Einfluss nanoskaliger Pulver	56

4.2.5	Prägen.....	58
4.2.6	Korrelation mechanischer Kennwerte und Umformergebnisse.....	92
4.3	Arbeitspaket 3: Herstellung und Optimierung von Metall-Keramik-Verbundfolien mit Eignung für umformende und strukturierende Bearbeitungsprozesse.....	93
4.3.1	Herstellung von 2K-Verbundfolien	93
4.3.2	Charakterisierung von 2K-Verbundfolien	97
4.3.3	Entwicklung von Vorgaben zur Co-Entbinderungs und Co-Sinterung-Route	100
4.4	Arbeitspaket 4: Entwicklung und Optimierung von Grünfolienverarbeitungsschritten	105
4.5	Arbeitspaket 5: Fertigungstechnologische Umsetzung der Verarbeitungsschritte	109
5	Zusammenfassung der Entwicklungsergebnisse	112
6	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	114
6.1	Veröffentlichung im Zusammenhang mit dem FuE- Vorhaben	114
6.2	Resonanz und Planungen	115
7	Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für KMU	116
7.1	Voraussichtliche Nutzung der angestrebten Forschungsergebnisse in KMU	116
7.2	Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU	117
7.3	Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse	118
8	Erläuterungen zur Verwendung von Zuwendungen.....	119
8.1	Notwendigkeit der durchgeführten Arbeiten	119
8.2	Durchgeführte Forschungsstellen	119
	Danksagung	121
	Literaturverzeichnis	121

1 Forschungsthema

„Flächige Stahl-Keramik-Verbundbauteile mit integrierten Kavitäten auf Basis von Grünfolien und deren quantifizierbare Bewertung der Verarbeitbarkeit“, Kurzbezeichnung **INKA**.

2 Motivation des Forschungsprojektes (wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung)

2.1 Anlass für den Forschungsantrag

Bauteile mit anforderungsgerecht einstellbaren Materialeigenschaften sind in vielfältigen Bereichen, wie bspw. in der Elektrotechnik und Elektronik, in der Medizintechnik und Mikroreaktionstechnik, in der Textiltechnik, im Werkzeugbau oder in der Kraftfahrzeugtechnik einsetzbar. Einstellbare Eigenschaften lassen sich beispielsweise durch die Kombination metallischer und keramischer Werkstoffen erreichen. Hiermit können beispielsweise eine verbesserte Verschleißbeständigkeit, gezielt einstellbare Wärmeleitfähigkeit oder die Kombination aus elektrischer Leitfähigkeit und elektrischer Isolation oder aus magnetischen und nicht magnetischen Eigenschaften anforderungsgerecht eingestellt werden.

Forschungsergebnisse aus den letzten fünf Jahren haben gezeigt, dass sich keramische oder metallische Grünfolien, sowie 2-komponentige Grünfolien sowohl über Tiefziehen, als auch über Prägen bei erhöhter und bei Raumtemperatur in einer dritten Dimension verformen und strukturieren lassen (EU-LARGE-Projekt „Multilayer“, FP7/2007/ NMP/214122). Diese Verfahren bieten damit neue Freiheitsgrade in der Bauteilgestaltung. Zudem tragen sie zu einer deutlichen Vereinfachung und Kostensenkung einer Verbundbauteilherstellung bei. Weiterhin wird durch den Einsatz umformender Strukturierungsmethoden bei Grünfolien die materialsparende Bauteilherstellung, die durch die Folientechnik geboten ist, verstärkt. Durch nachfolgendes Schichten mehrerer Folien (Laminieren) können Bauteile mit inneren und äußeren Strukturen in verschiedenen Materialkombinationen aus Metall und Keramik erzeugt werden. Der Bauteilverbund entsteht dabei durch ein gemeinsames Entbindern und Sintern der Materialverbunde.

Verbundbauteile aus Metall und Keramik mit integrierten Mikrostrukturen, geschaffen über gemeinsame Herstellung, konnten bislang nicht mit serientauglichen Verarbeitungsprozessen realisiert werden. Als Hauptschwierigkeiten, die eine automatisierte, gemeinsame Fertigung verhindern, wurden die zumeist subjektiven Eindrücke über die Verarbeitbarkeit keramischer beziehungsweise metallischer Grünfolien und wenige quantifizierbare Werte ermittelt, die eine spezifische Auswahl an Folienzusammensetzungen und geeigneten Verarbeitungsprozessen verhindern. Daraus ergab sich als Motivation für das Projekt INKA, ein systematisches Wissen zur Grünfolienverarbeitung in Form von Prozessparametern, Materialkennwerten, Grenzwerten und Fehlerklassen aufzubauen. Dies sollte über eine Erarbeitung von Methoden erfolgen, was zum einen über die Ermittlung mechanischer Kennwerte und deren Einfluss auf umformende Verarbeitung und zum Anderen über den Einfluss der Lagerbedingungen auf mechanische Kennwerte und Verarbeitbarkeit zu ermitteln war. Quantifizierbare Bewertungsmaßstäbe zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit keramischer oder pulvermetallurgischer Grünfolien existierten bislang nicht, weder für Einzel-, noch für Verbundfolien.

2.2 Stand der Forschung

Der Einsatz flächiger keramischer Bauteile mit integrierten Kavitäten ist aus verschiedenen Anwendungsbereichen bekannt. Für die Herstellung derartiger flächiger Bauteile mit bspw. integrierten Kavitäten oder Kontaktierungen kommen überwiegend Erzeugnisse zum Einsatz, die über Foliengießtechnologie hergestellt wurden. Zum anderen besteht die Möglichkeit, Bauteile dieser Art über Addi-

tive Manufacturing oder ggf. Spritzgusstechnologie herzustellen. Einen kurzen Überblick sollen nachfolgende Beschreibungen des aktuellen Stands der Technik vermitteln.

Unter Voraussetzung einer gemeinsamen Verarbeitbarkeit, was die Masseaufbereitung, die Formgebung bis hin zur gemeinsamen thermischen Behandlung einschließt, lassen sich Materialien unterschiedlicher Eigenschaften oder Optik miteinander kombinieren wie elektrisch oder thermisch leitfähig / isolierend, magnetisch – nicht magnetisch, schwarz – weiß, um einen kleinen Einblick zu geben.

2.2.1 Additive Fertigung

Mit der Entwicklung werkzeugfreier additiver Fertigungsmethoden (AM) vor mehr als zwei Jahrzehnten eröffneten sich bis dahin ungekannte Möglichkeiten in der Design-Freiheit für Bauteile unterschiedlicher Anwendung. Verschiedenste Verfahrensrouten wurden entwickelt, die sich entweder nach Ihrer Applizierungsweise in Punkt-, Linien- und Ebenenauftrag einteilen lassen oder aber nach dem eingesetzten Material, welches pulverförmig, pastös bis flüssig oder fest in Form von Drähten oder Blattweise zur Verfügung steht. Die Stabilität der Grünlinge, wie die Halbzeuge ebenfalls bezeichnet werden, richtet sich nach den eingesetzten Rohstoffen. So ist die mechanische Stabilität pulvergedruckter Bauteile vergleichsweise niedrig, die von flüssig bzw. pastös aufgebauten Strukturen hoch, was auch durch die Packungsdichte beeinflusst wird. Erst in den letzten Jahren eröffneten sich Möglichkeiten, auch zwei- und mehrkomponentige Bauteile zu fertigen. Diese befinden sich derzeit jedoch noch im Entwicklungsstadium [Sch-14] und stellen auf absehbare Zeit keine Alternative zu der Großserienfertigung von zweikomponentigen Grünfolien dar. Im Vergleich zu den im Projekt untersuchten Fertigungsrouten Tiefziehen und Prägen käme als alternative Herstellungsmethode für Metall-Keramik-Verbundbauteile auf der Basis von Grünfolien unter Zuhilfenahme der Additiven Fertigung lediglich das Laminated Object Manufacturing (LOM) in Betracht. Bei diesem Prozess werden aus Folien Schichten des virtuell zerlegten Bauteils ausgeschnitten bzw. gestanzt, anschließend gestapelt und verbunden [Klo-98]. Zwei und mehr Komponenten lassen sich auf diese Weise zusammen fügen. Diese Fertigungsmethodik beinhaltet jedoch den Nachteil, dass feine Rundungen, wie sie beim Tiefziehen realisierbar sind, nicht erzeugbar sind. Auch sehr feine oberflächlich eingebrachte oder grazile Strukturen können nicht in der gewünschten / geforderten Präzision eingebracht werden.

Generell ist anzumerken, dass sehr lange, dünnwandige Bauteile nur bedingt herstellbar sind. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die thermische Behandlung eine nicht in der Art kalkulierbare Schwindung mit sich bringt, die auch häufig einen Verzug auf der Länge beinhaltet, das die auf der Sinterunterlage aufliegende Komponente in Ihrer Schwindung behindert wird.

2.2.2 Zwei-Komponenten-Spritzguss und Einlege-Spritzgießen

Der Keramikspritzguss erlaubt die Fertigung hoch präziser, sehr komplexer ein- und zweikomponentiger Bauteile in sehr hohen Stückzahlen. Sehr filigrane Bauteile lassen sich ebenso gut fertigen wie vergleichsweise dickwandige von bis zu 10 mm an der dicksten Stelle. Das Verfahren stößt jedoch bei sehr dünnwandigen, langen Strukturen, speziell in zweikomponentiger Bauweise, an Grenzen der Machbarkeit, da bspw. ein vollständiges Ausfließen und das Vermeiden innerer Spannungen nicht gewährleistet werden kann. Auch Hohlstrukturen sind nur bedingt realisierbar. Ein zusätzlicher Nachteil ist der hohe Kostenfaktor für das Spritzgießwerkzeug, weshalb das Verfahren erst ab Stückzahlen > 10.000 rentabel ist.

Einen interessanten Ansatz, bezogen auf die im Projekt entwickelte Komponente „Knopfelektrode“, könnte das Einlegespritzgießen bieten. Hierbei werden Grünfolien keramischer oder metallischer Art als Halbzeug mit Feedstock hinterspritzt. Diese Technologie stellt ebenfalls eine durchaus ernst zu nehmende Fertigungsalternative dar. Sehr interessante Ergebnisse wurden diesbezüglich kürzlich vorgestellt bspw. Entwicklungen für die Schmuckindustrie. So wurden für eine Uhrenlunette keramische Grünfolien aus weißem Zirkonoxid mit schwarzem Feedstock hinterspritzt [Mannschatz], ge-