Schlussbericht- Teil 2

Berichtszeitraum: 01.09.2022 – 31.10.2025

Projekt-Nr.: FKZ 13GW0599

Verbundprojekt:
Entwicklung eines Kaltplasmamoduls zur Abluftdesinfektion und -reinigung von Beatmungsgeräten

Akronym: Beatmungshygiene

Teilvorhaben:
Entwicklung der Spritzgusstechnologie zur Herstellung einer Keramikelektrode als Bestandteil eines Kaltplasmamoduls

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung 3
2. Ziele und Ablauf 3
2.1. *AP 1.4:* Konzept Elektrodendesign 3
2.2. *AP 2.4:* Werkstoffentwicklung 3
2.3. *AP 3.4:* Keramiktechnologie 4
2.4. *AP 5.4:* Verbindungstechnologie 4
2.5. *AP 6.4:* Herstellung von Elektroden 5
2.6. *AP 9.4:* Betriebstests 5
2.7. Quartalsaufgelöste Verteilung der Personenmonate 6
3. Zusammenarbeit der Partner 7
4. Erzielte Ergebnisse 8
4.1. *AP 1.4:* Konzept Elektrodendesign 8
4.2. *AP 2.4:* Werkstoffentwicklung 8
4.4. *AP 5.4:* Verbindungstechnologie 12
4.5. *AP 6.4:* Herstellung von Elektroden 14
4.6. *AP 9.4:* Betriebstest 16
5. Voraussichtlicher Nutzen 17
6. Veröffentlichungen 18

1. Aufgabenstellung

In dem Teilvorhaben „Entwicklung der Spritzgusstechnologie (CIM) zur Herstellung einer Keramikelektrode als Bestandteil eines Kaltplasmamoduls“ sollte mit den Ergebnissen des Teilvorhabens durch den Projektpartner terraplasma der Aufbau der neuartigen Plasmamodule durch die gefertigten Plasmaelektroden möglich gemacht werden. Die Plasmamodule sollten durch Integration in bestehende Medizintechnik unmittelbar zur Verbesserung der Hygiene und damit zur Erreichung der förderpolitischen Ziele der Bekanntmachung beitragen.
In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Fraunhofer IKTS sollten dabei die Vorteile der CIM-Technologie bezüglich der Herstellung von Bauteilen mit komplexen Geometrien und der Möglichkeit von der Kombination von zwei unterschiedlichen Werkstoffen mit einem Formgebungsverfahren umgesetzt werden.

2. Ziele und Ablauf

Die Ziele und der Ablauf der Arbeitspakete unter Berücksichtigung der im Projektverlauf angestrebten technologischen Innovationen sind im Folgenden zusammengefasst.

2.1. *AP 1.4:* Konzept Elektrodendesign

- **Ziel:**
- Mitarbeit bei der Auslegung der Elektrode unter Berücksichtigung von Aspekten zur thermoplastischen Serienfertigung;
- **Ablauf:**
- Einbringen der Erfahrungen im Auslegen von keramischen Bauteilen in die Konstruktion;
- Einbringen von fertigungsrelevanten Aspekten in die Auslegung der Elektrode mittels Extrusion und Spritzgießen (Wandstärken, Kantenausformung, Größe);
- Abschätzung der Produktionskosten für unterschiedliche Fertigungsvarianten;
- gemeinsam mit IKTS, QSil und Terraplasma werden geeignete Werkstoffe identifiziert und Fertigungstechnologien ausgewählt und der Fertigungsablauf geplant.

2.2. *AP 2.4:* Werkstoffentwicklung

- **Ziel:**
- Auswahl und Bereitstellung von Rohstoffen zur Entwicklung der keramischen Elektrode;
- **Ablauf:**

Auswahl und Beschaffung von keramischen Rohstoffen (Pulver) nach den unter AP1 festgelegten Eigenschaften:

- in Zusammenarbeit mit QSil und IKTS werden die granulometrischen Eigenschaften spezifiziert;
- Aspekte der Wärmebehandlungstechnologie sind in die Auswahl einzubeziehen;
- Auswahl und Beschaffung von Binderkomponenten
- Nach Auswahl der Pulver wurden geeignete Binderkomponenten für die Extrusion, das Spritzgießen und den 3D-Druck vorgeschlagen und bereitgestellt;
- Durchführung von Vorversuchen zur Kompatibilität der Pulver mit dem Binder, ggf. Anpassung des Binderportfolios und/oder Änderung der vorgeschlagenen;
- Zusammenfassung der Erkenntnisse in einem Bericht zum Arbeitspaket.

2.3. *AP 3.4:* Keramiktechnologie

- **Ziele:**

Zusammen mit dem Projektpartner IKTS wurden co-sinterfähige Feedstockpaare entwickelt, die zur Herstellung der Keramikelektrode benötigt werden:

- Anpassung der Dichten der eingesetzten Bindersysteme;
- Anpassung der volumetrischen Füllgrade der Feedstockrezepturen;
- Umsetzung der Binderproduktion von Labor- in Produktionsmaßstab ohne Qualitätsverlust;

- **Ablauf:**

Beim IKTS wurde Feedstock für die Herstellung von Folien hergestellt, die das gleiche Schwindungsverhalten habe. Dazu musste volumetrische Füllgrad angepasst werden. Da bei den Feedstocks jeweils unterschiedliche Binderrezepturen aufgrund der unterschiedlichen Pulvereigenschaften eingesetzt werden mussten, war eine Anpassung der Binderdichten notwendig. Die Änderungen der Binderrezeptur sollten nicht das Fließverhalten und da Entbinderverhalten beeinflussen. Bei einer Binderrezeptur wurde daher der Bestanteil, der hauptsächlich die Dichte im System beeinflusst und zeitgleich für die Benetzung verantwortlich ist, der Gehalt verändert. Um die Anpassung der Binderdichten umzusetzen, mussten einige Binderansätze hergestellt und analysiert werden.

2.4. *AP 5.4:* Verbindungstechnologie

- **Ziele:**

- Herstellung der Feedstocks für die Herstellung von gefügten Folienbauteilen;
- Optimierung der thermoplastischen Eigenschaften (Viskosität) der Feedstocks hinsichtlich der Oberflächenverdichtung bei der Extrusion bzw. thermischen Umformung durch Parameteranpassungen;
- Optimierung der Parameter von der Prozessierung der Bauteile.

- **Ablauf:**

<u>Binderherstellung:</u>

Für die Herstellung von den gefügten Bauteilen wurden größere Mengen an Feedstock und somit an Binder benötigt. Dazu mussten der Binder in einer Produktionsanlage hergestellt werden bzw. die Parameter von der Laboreinheit mussten auf die Einheit übertragen bzw. angepasst werden, damit die Eigenschaften von dem Bindersystem nicht verändert werden.
Parallel wurde aus den Erfahrungen von den ersten Versuchen mit dem neuentwickelten Bindersystem die Prozessparameter von den Feedstocks bei der jeweiligen Formgebungsmethode angepasst, ohne die Rezeptur von dem Bindersystem ändern zu müssen.

<u>Entwicklung Prozessparameter:</u>

Zusammen mit Projektpartner IKTS wurden die Prozessparameter von der Lösemittelextraktionsanlage für die entwickelten Feedstock angepasst werden, damit der Extraktionsgrad ausreichend für die weitere Prozessierung war. Ein nicht ausreichender Extraktionsgrad kann beim Fügen der Follen beim Sintern zu Schwindungsunterschieden und somit zu Spannungen im Gefüge und somit zu Rissen in den Bauteilen führen. Dabei der Extraktionsgrad bei unterschiedlichen Zeiten und Temperaturen von prozessierten Folien bestimmt. Die Parameter, die den höchsten Extraktionsgrad bei den Folien ergeben haben, wurden für die Herstellung der gefügten Folienbauteile verwendet.

2.5. *AP 6.4:* Herstellung von Elektroden

- **Ziele:**

- Umsetzung der Fertigung einer Testserie;
- Testen einer Second Source von einer Hauptkomponente bezüglich einer spätere Liefersicherheit.

- **Ablauf:**

Für die Umsetzung der Fertigung der Testserie wurden nochmal größerem Mengen an Binder hergestellt und charakterisiert, um die Chargenvergleichbarkeit und die Toleranzgrenzen von den festgelegten Spezifikationen für die Bindersysteme zu überprüfen. Aus den hergestellten Bindermengen wurden beim Projektpartner Feedstocks hergestellt, die zum Herstellen von Bauteilen für eine Testserie verwendet wurden.
Am Ende des Projektes wurde nach einem Ersatzrohstoff von einer Hauptkomponente vom Bindersystem gesucht und ausgewählt. Mit der Ersatzrohstoff wurde eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Hintergrund war dabei, das im Laufe des Projektes bekannt wurde, dass sich die zukünftige Liefersituation von der Hauptkomponente geändert hatte (Status Produkt „in stock“ zu „made to order“).

2.6. *AP 9.4:* Betriebstests

- **Ziel:**

- Schlussfolgerungen zur weiteren Anpassung des Designs und der Fertigung der Keramikelektrode;

- **Ablauf:**

- gemeinsame Diskussion der werkstofflichen, strukturellen und Langzeituntersuchungsergebnissen mit allen Partnern;
- Erarbeiten von Schlussfolgerungen für die zukünftige Serienfertigung bzgl. der Materialauswahl, des Elektrodendesigns, der Herstellung von thermoplastischen Feedstocks für Extrusion und Spritzgießen, der Spritzgießfertigung und der Kombination mit 3D-gedruckten Strukturen;
- Zusammenfassung der Erkenntnisse aus allen Arbeitspaketen in einem projektübergreifenden Bericht.

2.7. Quartalsaufgelöste Verteilung der Personenmonate

Projektjahr 2022	*1. Quartal*	*2. Quartal*	*3. Quartal*	*4. Quartal*	***Summen je AP***
AP 1: Konzept Elektrodendesign	*0,5*	*0,5*	*0,5*	*0,5*	***2,0***
AP 2: Werkstoffentwicklung	*1,0*	*1,0*	*1,0*	*1,0*	***4,0***
AP 3: Keramiktechnologie	*-*	*-*	*-*	*-*	***0***
AP 5: Verbindungstechnologie	*-*	*-*	*-*	*-*	***0***
AP 6: Herstellung von Elektroden	*-*	*-*	*-*	*-*	***0***
AP 9: Betriebstests	*-*	*-*	*-*	*-*	***0***
Summen je Quartal	***1,0***	***1,5***	***1,5***	***1,5***	***Gesamt 6,0***

Projektjahr 2023	*1. Quartal*	*2. Quartal*	*3. Quartal*	*4. Quartal*	***Summen je AP***
AP 1: Konzept Elektrodendesign	*1,0*	*-*	*-*	*-*	***1,0***
AP 2: Werkstoffentwicklung	*1,5*	*1,5*	*1,0*	*-*	***4,0***
AP 3: Keramiktechnologie	*0,5*	*1,5*	*2,5*	*1,5*	***6,0***
AP 5: Verbindungstechnologie	*0,5*	*1,5*	*1,5*	*1,5*	***5,0***
AP 6: Herstellung von Elektroden	*-*	*-*	*-*	*-*	***-***
AP 9: Betriebstests	*-*	*-*	*-*	*-*	***-***
Summen je Quartal	***3,5***	***4,5***	***5,0***	***3,0***	***Gesamt 16,0***

Projektjahr 2024	*1. Quartal*	*2. Quartal*	*3. Quartal*	*4. Quartal*	***Summen je AP***
AP 1: Konzept Elektrodendesign	*-*	*-*	*-*	*-*	***-***
AP 2: Werkstoffentwicklung	*1,0*	*-*	*-*	*-*	***1,0***
AP 3: Keramiktechnologie	*2,0*	*-*	*-*	*-*	***2,0***
AP 5: Verbindungstechnologie	*0,5*	*1,5*	*1,5*	*1,5*	***5,0***
AP 6: Herstellung von Elektroden	*-*	*-*	*0,5*	*1,5*	***2,0***
AP 9: Betriebstests	*-*	*-*	*-*	*-*	***-***
Summen je Quartal	***3,5***	***1,5***	***2,0***	***3,0***	***Gesamt 10,0***

Projektjahr 2025	*1. Quartal*	*2. Quartal*	*3. Quartal*	*4. Quartal*	***Summen je AP***
AP 1: Konzept Elektrodendesign	*-*	*-*	*-*	*-*	***-***
AP 2: Werkstoffentwicklung	*-*	*-*	*-*	*-*	***-***
AP 3: Keramiktechnologie	*-*	*-*	*-*	*-*	***-***
AP 5: Verbindungstechnologie	*-*	*-*	*-*	*-*	***-***
AP 6: Herstellung von Elektroden	*-*	*-*	*-*	*-*	***-***
AP 9: Betriebstests	*0,1*	*0,1*	*0,1*	*0,1*	***0,4***
AP10: Abschlussbericht	*-*	*-*	*-*	*0,1*	***0,1***
Summen je Quartal	***0,1***	***0,1***	***0,1***	***0,2***	***Gesamt 0,5***

3. Zusammenarbeit der Partner

Die Zusammenarbeit mit den Partnern entsprach im Projektverlauf der Vorgabe in der Gesamtvorhabensbeschreibung:

Kooperation mit IKTS:
- Abstimmung der Zusammensetzung verschiedener Massen zur Herstellung von Kompositvarianten zur Einstellung unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften;
- Abstimmung zum Einsatz von Bindesystemen und detaillierte Testung des Verarbeitungsverhaltens, Kombination eigener Methoden mit Methoden am IKTS;
- Untersuchungen und Charakterisierung technologischer Parameter von experimentellen Keramikmassen von IKTS;

Kooperation mit QSIL:
- Abstimmung zu technischen Parametern für Formgebung und Sinterung;
- Bereitstellung von keramischen Massen zur Probenherstellung für Charakterisierungsarbeiten zu Werkstoffstruktur und Eigenschaften;
- Abstimmung von konstruktiven und Fertigungskonzepten mit Bezug zu Formgebungskonzepten;
- Mitarbeit bei der Herstellung von Testserien;
- Gemeinsame Untersuchungen zur Charakterisierung von keramischen Massen entsprechend den jeweiligen technischen Möglichkeiten;

Kooperation mit terraplasma:
- Erarbeitung konstruktiver und werkstofflicher Konzepte der Plasmaelektrode;
- Abstimmung und Anpassung von Entwicklungsaufgaben und Zielstellungen mit dem Projektpartner mit Bezug zur Massefertigung und Formgebung;
- Diskussion zur Optimierung von werkstofflichen und fertigungstechnischen Optimierungen mit dem Projektpartner;

Kooperation mit Fraunhofer IZI:
- Abstimmung, Informationsaustausch zum Elektronendesign;
- Diskussion zum Betriebsverhalten im Messstand mit dem Projektpartner.

4. Erzielte Ergebnisse

4.1. *AP 1.4:* Konzept Elektrodendesign

- **Ergebnisse:**

Mit den Projektpartnern wurden bei der Besprechung über die Auslegung der Elektrode aus keramischen Werkstoffen in der Konstruktion für die thermoplastische Formgebung folgende Punkte ausgetauscht:

- Zugspannungen bei der Konstruktion (z.B. beim Entformen) vermeiden;
- möglichst kleine Wandstärken (<5mm);
- gleichmäßige Wandstärkten Druckspitzen bei der Formgebung vermeiden);
- Kerbwirkungen vermeiden: große Radien statt scharfer Ecken;
- Punktbelastungen vermeiden;
- zu komplexe, herausfordernde Geometrien vermeiden: lieber Abstriche von der späteren Funktion hinnehmen, anstatt Gefahr zu laufen, Projekte nicht umgesetzt zu bekommen.

Bei einer ersten Einschätzung der Fertigungskosten für die Elektrode zeigte sich, dass bei der Herstellung von der Elektrode das Fügen von einem leitenden und nichtleitenden Material die Kombination Extrusion (statt Spritzguss) mit dem 3D-Druck die kostenneutralste Variante wäre. Beim 2-Komponenten -Spritzguss würden die Anschaffung des Werkzeugs die Fertigungskosten in die Höhe Treiben.
Das IKTS hat aus Erfahrungen in früheren Projekten die Werkstoffkombination Titanoxid und Zirkoniumdioxid als Werkstoffe für die Elektrode ausgewählt. Beide haben einen ähnlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten und haben sehr gute Eigenschaften (Zirkoniumdioxid = hohe Dielektrizitätskonstante= Isolator / Titandioxid = Fotokatalysator = reaktiver Stickstoff & Sauerstoff) zum Erzeugen eines Kaltplasma zum Beispiel zum Abtöten von Bakterien oder Viren. Von beiden Werkstoffen gibt es Pulverqualitäten, die in der thermoplastischen Formgebung eingesetzt werden können.

- **Fazit:**

In diesem Arbeitspaket konnten durch das Festlegen der Auslegung von dem Elektrodenbauteil in die Konstruktion, der Formgebungsmethode und die Werkstoffauswahl die Voraussetzungen zum erfolgreichen Umsetzten der folgenden Arbeitspakete geschaffen werden.

4.2. *AP 2.4:* Werkstoffentwicklung

- **Ergebnisse:**

Bei der Werkstoffentwicklung wurden die für eine Auswahl eines geeigneten Werkstoffsystems notwendigen physikalischen Eigenschaften im Einsatz im CIM-Prozess vorgegeben bzw. spezifiziert:

- Partikelgrößenverteilung D50 0,1-0,5µm;
- Einheitliche Partikelgrößenverteilung (monomodale Partikelgrößenverteilung)
- Spezifische Oberfläche 5-8 m^2/g;
- Runde Partikelform;
- Wärmeausdehnungskoeffizient ähnlich Aluminiumoxid: 5,5 und 8,5 $\cdot 10^{-6} K^{-1}$;
- Oberfläche der Partikel frei von keramischen Hilfsmitteln.

Bei der Auswahl von dem Bindersystem für die unterschiedlichen Formgebungsmetoden (Extrusion, das Spritzgießen und den 3D-Druck) wurde ein System auf der Basis eines Polyamids und einem Weichmacher ausgewählt. Dieses zeigt während der Formgebung und beim nachträglichen Erhitzen in einem definierten Temperaturbereich (90°C-110°C) ein gleichbleibendes plastisches und elastisches Verhalten unabhängig von der Forgebungsmethode.
Nach der Auswahl der Pulver wurden dem Projektpartner IKTS Bindermaterial mit Standardrezepturen für Vorversuche mit den ausgewählten Pulvern und Referenzfeedstocks aus dem PA-Bindersystem und ähnlichen keramische Pulvern, die in dem Projekt eingesetzt werden sollen.
Die aus dem bereitgestellten Bindersystem mit den ausgewählten Pulvern hergestellten Feedstocks ließen sich bei der Extrusion und dem Filamentdruck im Vergleich zum Referenzfeedstock verarbeiten:

- Extrusion:
  Die Extrusionsversuche konnten beim Projektpartner Problemlos durchgeführt werden. Dazu wurden zuerst in einem Messkneter von der Firma Brabender das keramische Pulver und das Bindersystem vorgemischt und anschließend in einem Doppelschneckenextruder verarbeitet werden. Die dabei extrudierte Testgeometrie zeigte keine Fehler;
- Filamentherstellung & 3D-Druck:
  Aus dem Feedstock für die Extrusion konnten Filamente hergestellt bzw. extrudiert werden, die wiederum im Einsatz im 3D-Druck getestet werden konnte. Hier hat sich gezeigt, dass der 3D-Druck durchführbar ist, aber für eine optimal Formgebung eine Rezepturanpassung im Bindersystem nötig war;
- Spritzguss:
  Für die Durchführung von Spritzgussversuchen wurde zu wenig Material zum Feedstock aufbereitet. Daher konnten keine Tests mit dieser Formgebungsmethode durchgeführt werden. Aufgrund des sehr guten Ergebnisses aus den beiden ersten Formgebungsmethoden konnte aber auf die Durchführung verzichtet werden bzw. das geeignete Bindersystem konnte ausgewählt werden.

- **Fazit:**

Für die Auswahl der in dem Projekt eingesetzten keramischen Pulver konnten die für den Einsatz in der thermoplastischen Formgebung geeigneten physikalische Eigenschaften spezifiziert werden.
Bei der Auswahl von dem Bindersystem hat sich gezeigt, dass die mit Hilfe dieser Spezifikation ausgewählten Pulver sich problemlos bei der unterschiedlichen Formgebungsmethoden verarbeiten lassen.
Das geeignete Bindersystem konnte ausgewählt werden bzw. es konnten die Eigenschaften an dem System ermittelt werden, die noch für den Einsatz im Projekt verbessert werden (Verbesserung Fließfähigkeit, Reduzierung Klebeneigung).

4.3. AP 3.4: *Keramiktechnologie*

- **Ergebnisse:**

Es wurden 4x verschieden Bindersystem hergestellt, mit denen die vom Projektpartner geforderten unterschiedlichen Binderdichten und Benetzungsverhalten umgesetzt werden sollten. In Abbildung 1 sin die Unterschiede der Bindersysteme dargestellt.

Binderkomponenten

- Basis AE020 (PA)

Bez.	PA / Weichmacher	Komp.1	Komp.3	Komp.4
AE022	wie AE020	+ +		+
AE026	wie AE020		+	
AE038	Variiert	-		
AE044	Variiert		+	

Abbildung 1: Unterschiede der Bindersysteme (INMATEC)

Die Bindersysteme wurden bei INMATEC mit einem Planetenmischer hergestellt (Bild 1).

Bild 1: Planetenmischer INMATEC

Beim Projektpartner Fraunhofer IKTS wurden die Bindersysteme mit dem im Projekt eingesetzten Leiterwerkstoff (Abbildung 2) zum Feedstock im Messkneter von der Firma Brabender verarbeitet (Abbildung 3).

TiO2+0,25mol%Nb2O5

- Leitfähige Komponente
- Mahlung und Granulierung bei Qsil

Abbildung 2: Leitwerkstoff (Fraunhofer IKTS / QSil)

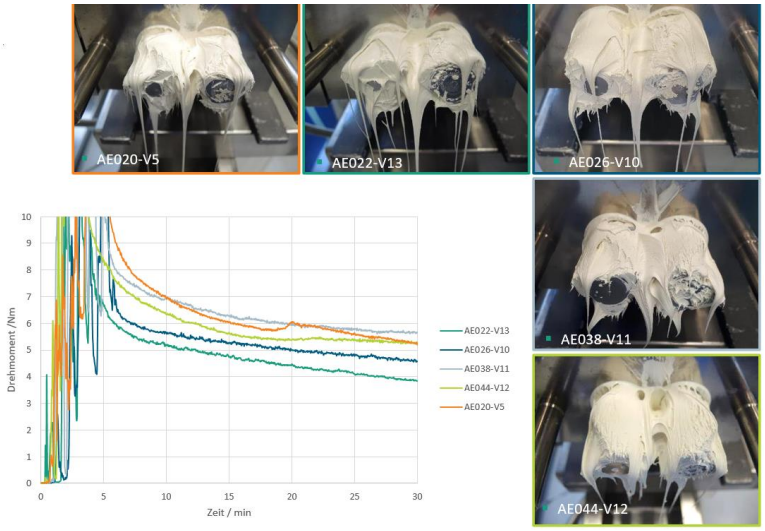


Abbildung 3: Herstellung Feedstocks mittels Messkneter der Firma Brabender (Fraunhofer IKTS)

Die aus den hergestellten Feedstock wurde zur Beurteilung der Oberfläche nach der Formgebung Substrate extrudiert (Abbildung 4):

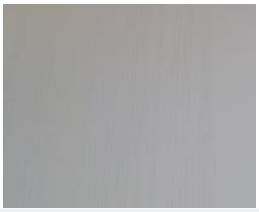
	AE022	AE026	AE038	AE044
Produktion	Niedrigviskos, Rel. geringe Temp., gut steuerbar	Anderes Verhalten, Folie klebt stark am Band, höhere Abkühlzeit, etwas höhere Temp. im Einzugsbereich	Temp. erhöht, hohes Drehmoment, moderater Druck, sehr stabil, kontinuierliche Ergebnisse	Sehr gut Verarbeitung, konstante Verarbeitung, klebt leicht an Förderband
Oberfläche				
Dicke	Mitte 1,15-1,2mm, leicht kleilig, am Rand 1,15-1,25mm	Mitte: 1,10-1,15mm Rand 1,05-1,15mm	Mitte: 0,95-1,05mm Rand: 0,75-0,9mm	Mitte: 1,00-1,1mm
Einschätzung	Sehr biegsam, weicher Eindruck,	Starke Klebrigkeit	Sehr formstabil, trotzdem hohe Flexibilität, gute Oberfläche,	Beste Maßhaltigkeit

Abbildung 4: Beurteilung Oberflächenqualität der Substrate (Fraunhofer IKTS)

Zusätzlich wurde zur Beurteilung der Qualität der Bindersystem bei der Filamentextrusion die mittels dem Hochdruck-Kapillarviskosimeter getestet (Abbildung 4):

Feedstock	Druck	Biege-radius	Oberfläche		Bewertung 3D-Druck
AE020-V5	4 Mpa			flexibel	
AE022-V13	7 Mpa	20 mm		spröde	Gute Haftung an Druckbett / starke Überextrusion durch starkes Verschmieren an Umlenkstellen.
AE026-V10	6-8 Mpa	20 mm		spröde	Schlechte Haftung an Druckbett / Starke Überextrusion durch dicken Filamentdurchmesser / Gute Schichtanbindung
AE038-V11	15 Mpa	20 mm		spröde	Schlechte Haftung an Druckbett / Starke Überextrusion durch dicken Filamentdurchmesser / Gute Schichtanbindung
AE044-V12	11 MPa	20 mm		spröde	Schlechte Haftung an Druckbett / Starke Überextrusion durch dicken Filamentdurchmesser / Gute Schichtanbindung

Abbildung 5: Beurteilung Oberflächenqualität Filamente (Fraunhofer IKTS)

Der Feedstock aus dem Bindersystem AE038 wurden bei der Substrat- und Filamentextrusion folgende Eigenschaften mit gut bis sehr gut bewertet:
- gute Schichtanbindung;
- sehr gute formstabil;
- hohe Flexibilität trotz sehr hohen Pulverfüllgrad (>53 vol-%, Ziel: >50,0 Vol-%);
- gute Oberflächenbeschaffenheit.

Daher wurde dieses Bindersystem für die folgenden thermoplastischen Formgebungsmethoden von dem Projektpartner Fraunhofer IKTS verwendet:
- 3D-Druck der Elektrode mittels FFF-Verfahren auf Substrat;
- Laminieren von Isolator- und Leiterfolie.

Da bei hohen Pulverfüllgraden die Flexibilität der Feedstocks aus dem Bindersystem AE038 bei der Herstellung der Filamente und Substrate nicht verschlechtert, konnten bei den Formgebungsversuchen die Pulverfüllgrade der Feedstock zum Fügen bei der Prozessierung der Bauteile angepasst werden.

- **Fazit:**

Durch eine gezielte Anpassung der Binderdichte bzw. Zusammensetzung von dem System konnten die volumetrischen Pulverfüllgrade von den Feedstocks angepasst werden, damit diese bei den eingesetzten thermoplastischen Formgebungsmethoden und Prozessierung zusammengefügt werden. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass mit dieser Anpassung das plastische und elastische Verhalten von dem Feedstock durch Änderungen der Füllgrade nicht verschlechtert wird.
Mit dieser Erfahrung können zukünftig bei Änderung der Pulvereigenschaften oder der Rohstoffe ohne viel Entwicklungsaufwand der Pulverfüllgrad der Feedstocks für eine definierte Schwindung eingestellt werden.

4.4. *AP 5.4:* Verbindungstechnologie

- **Ergebnisse:**

<u>Binderherstellung:</u>
Von dem Bindersystem AE038 wurden bei der Firma INMATEC auf einem Produktionsaggregat in größeren Mengen hergestellt. Dabei wurde das Produkt als Standardartikel spezifiziert (= Umstellung von Labor in Produktionsmaßstab). Damit konnte während dem Projekt gesicherte gleichbleibende Qualitäten von dem System hergestellt werden, was wiederum eine gleichbleibende Qualität für die in dem Projekt hergestellten Feedstocks bedeutet hat. Somit konnte die Konzentration in dem Projekt auf die Auswahl bzw. Entwicklung der geeigneten Pulverrohstoffe gelegt werden.

<u>Feedstockherstellung:</u>
Die Feedstockherstellung wurde zusammen beim Projektpartner Fraunhofer IKTS durchgeführt. Auch hier konnten die Prozessparameter für die Herstellung der Feedstocks mit dem Bindersystem AE038 spezifiziert bzw. fixiert werden, sodass eine Anpassung der Pulverfüllgrade bei Änderungen der Pulverzusammensetzungen ohne erhöhten Aufwand bei der Feedstockentwicklung umgesetzt werden konnte.

Thermoplastische Formgebung:

Die Feedstocks mit dem entwickelten Bindersystem AE038 wurden in diesem Projekt vom Projektpartner Fraunhofer IKTS in drei Formgebungsmethoden zum Fügen von keramischen Pulvern eingesetzt:

- Bedrucken von Substraten mittels Filamentextrusion (FFF-Verfahren);
- Laminieren;
- Wirkmedienbasiertes Umformen von thermoplastischen keramischen Grünfolien;

In den Abbildungen 6 & 7 sind die Verfahrensabläufe von den Methoden dargestellt:

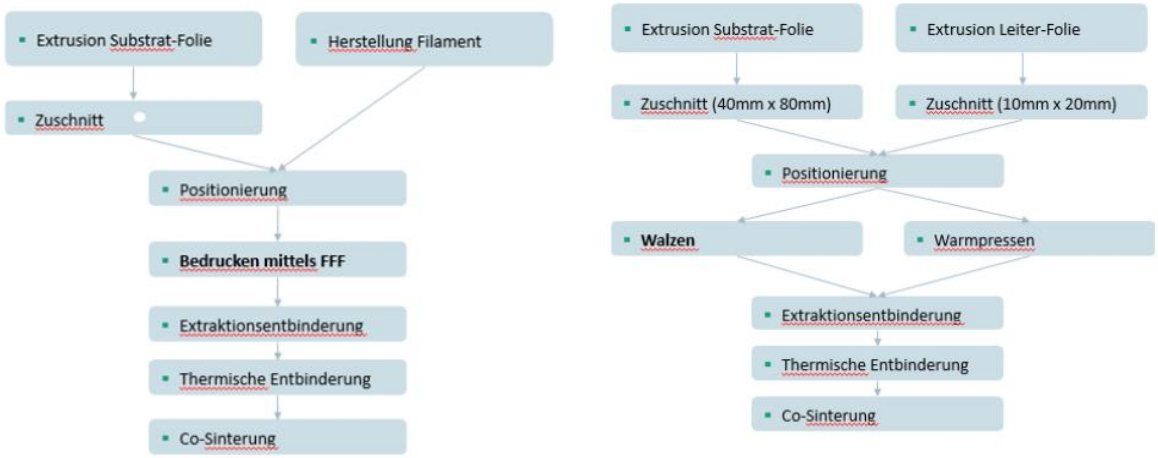


Abbildung 6: links: Bedrucken mittels Filamentextrusion (FFF-Verfahren); rechts: Laminieren (Fraunhofer IKTS)

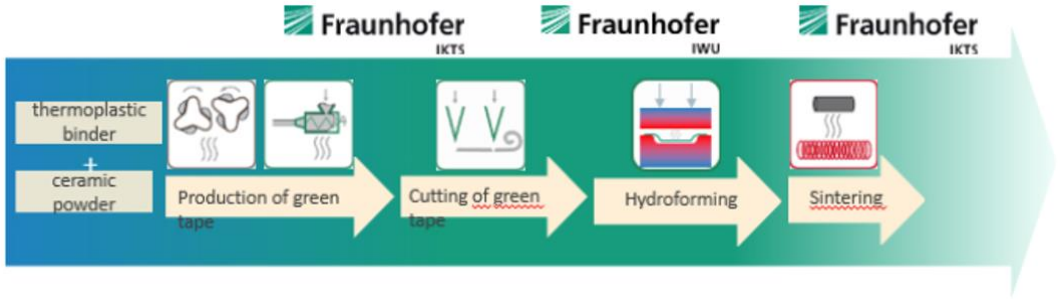


Abbildung 7: Wirkmedienbasiertes Umformen von thermoplastischen keramischen Grünfolien (Fraunhofer IKTS)

Für den Einsatz in den Methoden wurden größere Mengen bzw. unterschiedlichen Chargen dem Bindersystem zur Herstellung von Feedstocks zur Verfügung gestellt.

Die Bindergehalte der Feedstock mussten für jeden Formgebungsverfahren bezüglich dem volumetrischen Füllgrad angepasst werden. Durch Veränderung der Prozessparameter (Temperaturen) bei der jeweiligen Formgebungsmehtode konnte auf die geänderte Viskositätsverhalten eingegangen werden.

Grundsätzlich konnten mit allen drei Methoden Grünteile (Abbildung 8) von dem Projektpartner hergestellt und anschließend für die Entwicklung der Prozessierung (Co-Entbindern, Co-Sintern) verwendet werden (siehe Abbildung 8).

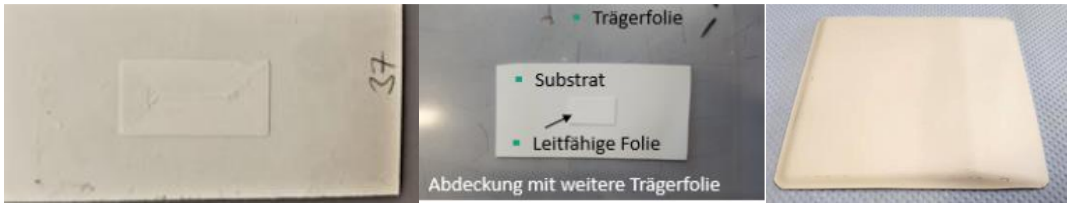


Abbildung 8: links: FFF-Verfahren; Mitte: Laminieren; rechts: Umformen

Die Entwicklung der Prozessparameter für das Entbindern wurden unter Vorgabe von INMATEC durchgeführt. Dafür wurden vorab Bauteile aus einem Aluminiumoxidfeedstock und dem Bindersystem AE038 bei der Firma INMATEC entbindert und anschließend gesintert. Die entwickelten Prozessparameter wurden dem Projektpartner Fraunhofer IKTS zur Verfügung gestellt.
Der Projektpartner konnte mit diesen Vorgaben die Entwicklung der Prozessparameter beginnen. Als Richtwert für ein Entbindern unter ausreichenden Bedingungen diente der Extraktionsgrad nach der Lösemittelentbinderung. Wenn dieser Wert zu gering war, konnte man Risse in den thermischen und gesinterten Bauteilen feststellen. Daher wurde sich zuerst auf die Entwicklung der Prozessparameter für die Lösemittelentbinderung konzentriert werden. Es hat sich im Laufe des Projekts gezeigt, dass mit einem hohen Extraktionsgrad deutlich weniger fehlerhafte Bauteile beim anschließend thermischen Entbindern und Sintern (Fügen von 2x Werkstoffen) hergestellt werden.

- **Fazit:**

Durch die Umstellung des Bindersystem auf ein Standprodukt mit einer spezifizierten Qualität konnte in dem Projekt die Entwicklung der Feedstocks und die Prozesse von den unterschiedlichen Formgebungsmethoden mit sehr geringen Chargenunterschieden durchgeführt werden, was die Entwicklungszeit beim Projektpartner reduzieren konnte.
Die Überprüfung des Extraktionsgrads wird bei der Herstellung von gefügten Bauteilen entscheidend sein. Eine Unterschreitung des spezifizierten Grades wird aus Erfahrung durch die Versuche zwangsläufig zu Rissen im Gefüge führen.

4.5. *AP 6.4:* Herstellung von Elektroden

- **Ergebnisse:**

Mit dem Projektpartner Fraunhofer IKTS wurden für die Herstellung der Elektroden die Spezifikation von dem Bindersystem aus den Erfahrungen der ersten Versuche in den vorherigen Arbeitspaketen angepasst. Somit konnten ausreichend Material von dem Bindersystem zur Verfügung gestellt werden bzw. die Ausschussratte bei den produzierten Bauteilen konnte kontinuierlich im Laufe des Projektes reduziert werden.
Damit zukünftig die Lieferfähigkeit von dem Bindersystem garantiert werden kann, wurden alternative Rohstoffe für die Hauptkomponente (PA) in dem Bindersytem getestet.
Es wurden insgesamt zwei PA-Alternativen getestet. Die Auswahl der Alternativen erfolgte in Zusammenarbeit mit Lieferanten von dem derzeitigen PA-Rohstoff.
In Vorabversuchen bei dem Projektpartner Fraunhofer IKTS wurde das Aufschmelzverhalten aller drei Rohstoffen bei der Feedstockherstellung mittels Messungen mit dem Messkneter von Brabender untersucht. Als Pulver wurden ein 99.7 % Aluminiumoxid verwendet.

Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass beide Alternativen sich in ihren Aufschmelzverhalten im Vergleich zum derzeit eingesetzten PA-Rohstoff deutlich zu unterscheiden (siehe Abbildung 9).

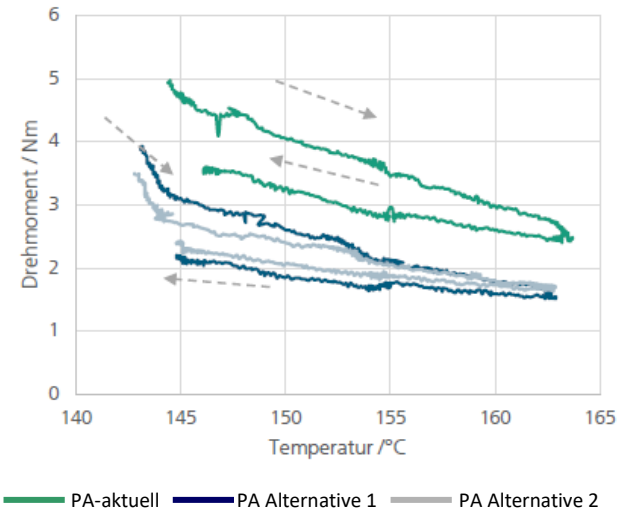


Abbildung 9: Messkneter Drehmoment vs. Temperatur beim Aufheizen & Abkühlen

Die alternativen PA-Rohstoffe zeigen ab einer Aufschmelztemperatur von 145°C beim Aufheizen und Kneten der Feedstocks einen deutlich geringen Drehmomentwert. Das heißt, sie bringen nach dem Aufschmelzen einen deutlich geringeren Widerstand beim Kneten auf bzw.. die Viskosität ist geringer.
Das elastische Verhalten bei der Formgebung der Feedstocks mit den PA-Alternativen wurde beim Projektpartner mittels dem Hochdruck-Kapillar-Viskosimeter gemessen (Abbildung 10).

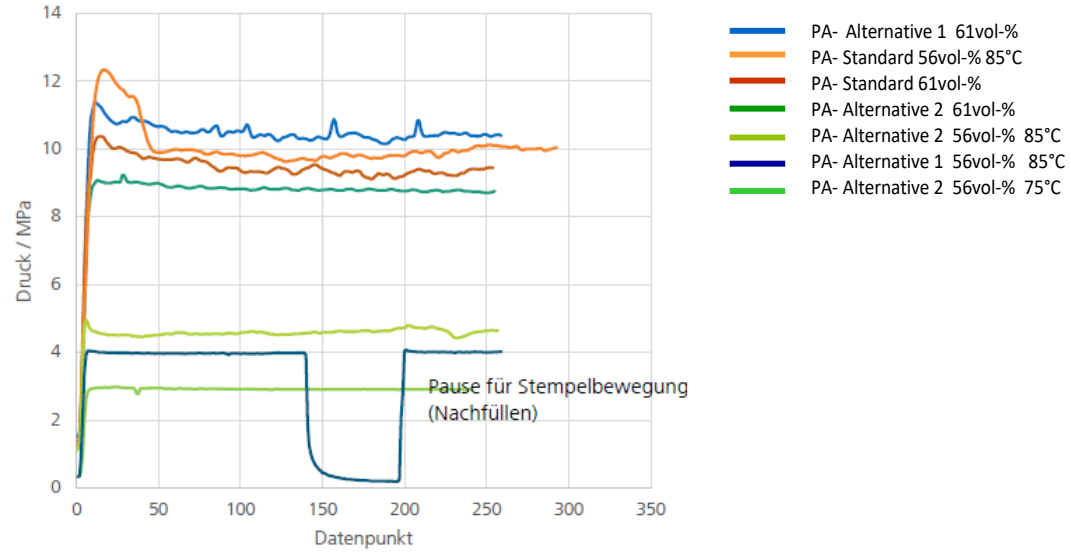


Abbildung 10: Messungen Hochdruck-Kapillarviskosimeter

Generell zeigt sich, dass bei hohen Füllgraden auch der Druck sehr hoch ist (hohe Viskosität). Die Stränge, die bei der Messung extrudiert wurden, konnten bei alle Feedstocks bezüglich ihrer Elastizität beurteilt werden.
Dabei hat sich gezeigt, dass die Feedstocks auf der Basis der Alternative 2 ein ähnliches elastisches Verhalten zeigen wie der derzeitig eingesetzte PA-Rohstoff (= PA-Standard).

Mit diesem Ergebnis wurde die PA-Alternative 2 für die Entwicklung des Bindersystems AE038 mit einem PA-Ersatzrohstoff ausgewählt.
Dazu wurden noch in diesem Projekt größere Mengen von Feedstocks mit dem Bindersystem AE038-V-2 hergestellt und bei der Firma INMATEC mittels des Spritzgusses getestet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Feedstocks mit dem alternativen PA sich sowohl beim Spritzgießen als auch bei der nachträglichen Prozessierung im Vergleich zu den Feedstocks mit dem Standard-PA-Rohstoff verhalten.

- **Fazit:**

Mit den angepassten Spezifikationen für die Herstellung von den in dem Projekt entwickelten Bindersystem konnten mehrere Binderchargen produziert werden, die innerhalb des festgelten Toleranzbereichs lagen. Dies war die Voraussetzung, um bei der Produktion der Testserie beim Projektpartner Fraunhofer IKTS eine geringe Ausschussrate erlangen zu können.
Eine alternative Binderkomponente konnte im Austausch zu der Hauptkomponente gefunden und mittels einer Machbarkeitsstudie qualifiziert werden. Damit kann eine Lieferfähigkeit von dem Bindersytem AE038 zur Herstellung von Feedstock für die in diesem Projekt entwickelten Formgebungsmethoden zukünftig garantiert werden.

4.6. *AP 9.4*: Betriebstest

- **Ergebnisse:**

Eine gemeinsame Diskussion der werkstofflichen, strukturellen und Langzeituntersuchungsergebnissen mit allen Partnern wurde durchgeführt. Es hat sich in Versuchen gezeigt, dass die ausgewählte Werkstoffkombination für einen Langzeitbetrieb geeignet ist. Inwiefern die Feedstockqualität, die maßgeblich auch abhängig von der Rohstoffauswahl und -Qualität ist, die Formgebung und damit die Bauteilqualität im späteren Einsatz als Kaltplasmaquelle beeinflusst, kann sich erst bei der Herstellung von größeren Bauteilmengen bzw. unterschiedlichen Rohstoffchargen zeigen. Es zeigt sich aber schon jetzt, dass das in dem Projekt weiterentwickelte Bindersystem die nötigen Anpassungen bezüglich der Rezepturzusammensetzung beim Fügen der eingesetzten Werkstoffkombination hinsichtlich gleichbleibender Formgebungsparameter kompensiert, was bei einer zukünftigen Serienproduktion eine Voraussetzung für eine gleichbleibender Bauteilqualität ist.

- **Fazit:**

Das in dem Projekt entwickelte Bindersystem eignet sich zur Herstellung von Plasmaelektroden in größeren Stückmengen.

5. Voraussichtlicher Nutzen

Da in dem Projekt ein neues Bindersystem entwickelt und als Standardprodukt bei der Firma INMATEC qualifiziert werden konnte, kann dieses Produkt für die innerhalb des Projektes vom Projektpartner Fraunhofer IKTS entwickelten Formgebungsmethoden zum Fügen von zwei keramischen Werkstoffen als Additiv zur Herstellung von den benötigten Feedstocks verwendet werden. Letztere können dann auch zusammen mit dem Projektpartner vermarktet werden.
Bei der Entwicklung von dem Bindersystem konnten aber noch weiter Ergebnisse erzeugt werden, deren Verwertung und Erfolgsaussichten in Tabelle 3 aufgelistet sind.

Tabelle 1: Verwertung der Entwicklungsergebnisse

Konkrete Verwertung	**Erfolgsaussichten**	**Zeithorizont**
Kenntnis über Auswahl und Einsatz neuer Ersatzrohstoffe in bestehende Standartrezepturen	Sehr hoch, Ersatzrohstoffe garantieren die Lieferfähigkeit von Standardprodukten	1-3 Jahre
Kompetenzerweiterung bei der Kompositherstellung	Sehr hoch, keramische Komposite gewinnen zukünftig an Bedeutung für Hybridisierung und Eigenschaftsoptimierungen	5-8 Jahre
Kenntnisse bezüglich der Beeinflussung des thermoplastischen und elastischen Verhaltens durch gezielte Änderungen in der Rezeptur (z.B. Anpassung der Binderdichten zum Einstellen eines gewünschten Pulverfüllgrades)	Sehr hoch, das Einstellen der Pulverfüllgrade ist nicht nur in der Fügetechnologie notwendig, sondern auch beim Wechsel von Pulverqualitäten und -chargen, wenn die Spezifikation der eingesetzten Rohstoffe sehr breite ist	1-3 Jahre
Kenntnisse bezüglich neuer thermoplastischer Formgebungsmethoden (z.B. Umformtechnologie)	Hoch, die Erfolgsaussichten von der Einführung neuer Formgebungsmethoden sind sehr stark abhängig von den Fertigungskosten: Meist sind im die Anschaffungskosten bei der thermoplastischen Formgebungsmehtode größer als bei Konkurrenzmethoden => eine neue Methode setzen sich auf dem Markt nur durch, wenn die technischen und wirtschaftlichen Vorteile (=hohe Stückzahlen/ geringer Ausschuss/ flexible Materialauswahl/ wenig Materialverlust) gegenüber der Konkurrenzmethoden deutlich überwiegen	8 Jahre

6. Veröffentlichungen

Die Firma INMATEC wird zusammen mit dem Projektpartner Fraunhofer IKTS die Teilergebnisse in Fachzeitschriften (z.B. PIM International und CFI) veröffentlichen.
Zukünftig werden die gemeinsamen Entwicklungen auf Fachmessen (z.B. Formnext, FAKUMA, CERAMITEC, IAA) beworben und auf Fachkongressen (z.B. bei den Messen und DKG-Jahrestagung/Shaping ECerS) vorgestellt.
Zusammen erarbeitete Teilergebnisse wurden von unserem Projektpartner zum Beispiel auf der Fachkonferenz Material Forming – ESAFORM 2024 in Toulouse, Frankreich, präsentiert und veröffentlicht:

- Titel: Investigations on the production and forming of thermoplastic ceramic green tapes
- Autoren/-innen: TRÂN Ricardo, MANNSCHATZ Anne, PSYK Verena, GÜNTHER Anne, DIX Martin.