

# Projekt ACC Schlussbericht

---

Advanced Casting Cell

## **Gesamtvorhaben:**

Additive Herstellung von Gussformen für große Metallgusskomponenten von Offshore-Windkraftanlagen

## **Teilvorhaben:**

Entwicklung eines additiven Fertigungsprozesses zur Herstellung großer Sandgussformen und dessen Umsetzung in Form eines Prototypischen Drucksystems

## **Kooperationspartner:**

voxeljet AG Paul-Lenz-Str. 1a, 86316 Friedberg (By)  
Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und  
Verarbeitungstechnik IGCV, 85748 Garching Deutschland  
GE Renewables Germany GmbH, 20097 Hamburg Deutschland

**Förderkennzeichen: 03EE3045A**

**DOI: <https://doi.org/10.34657/19074>**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Autoren: Alexander Kudernatsch  
Matthias Steinbusch

Datum: 18.07.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

# 1 Inhalt

<b>1.</b>	<b>Kurzdarstellung</b>	<b>3</b>
1.1.	Aufgabenstellung.....	3
1.2.	Projekt-Voraussetzungen.....	3
1.3.	Planung und Ablauf des Projektes.....	3
1.4.	Angaben zum wissenschaftlichen und technischen Stand.....	4
<b>2.</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>5</b>
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen.....	5
2.2.1.	Materialentwicklung und Parametersuche (WP5).....	5
2.2.1.1.	Materialset & Parameter.....	5
2.2.1.2.	Erster Testabguss (IGCV WP2).....	6
2.2.2.	Gegenüberstellung polares vs. kartesisches Drucken.....	6
2.2.3.	Design und Aufbau Demonstrator (WP3).....	7
2.2.3.1.	Übersicht Gesamtsystem.....	7
2.2.3.2.	Pylone (Z-Achsen zum Heben der Prozessachsen) (WP3).....	8
2.2.3.3.	X-Achsen (WP3).....	8
2.2.3.4.	Bauplatzform (WP3).....	8
2.2.3.5.	Querträger und Y-Achse (WP3).....	9
2.2.3.6.	Druckkopf (WP3).....	9
2.2.3.7.	Park- und Schutzeinrichtung Druckkopf (Cappingstation) (WP3).....	9
2.2.3.8.	Spitting-/Purgeeinheit (WP3).....	9
2.2.3.9.	Reinigungsstation Druckkopf (WP3).....	9
2.2.3.10.	Fluidsystem.....	10
2.2.3.11.	Fireboard (Druckdatencontroller).....	10
2.2.3.12.	Formstoffmischer und externe Sandversorgung (WP3).....	11
2.2.3.13.	Sandzuführung (Mischer-Recoater).....	11
2.2.3.14.	Recoater (Sandbeschichter).....	11
2.2.3.15.	Recoaterreinigung.....	11
2.2.3.16.	Schaltschrank-Elektrik.....	11
2.2.3.17.	Umhausung.....	12
2.2.3.18.	Endmontage (WP3).....	12
2.2.4.	SPS Programmierung (WP6).....	12
2.2.5.	UI Programmierung (WP6).....	12
2.2.6.	Abnahmegussform und Testabguss (WP5).....	13
2.3.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	13
2.2.7.	Wirtschaftliche Bewertung.....	14
2.4.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	14
2.5.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplans.....	15
2.6.	Durchführung des Vorhabens und Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen.....	15
2.7.	Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	15

# 1. Kurzdarstellung

## 1.1. Aufgabenstellung

Projektziel war die Entwicklung eines Demonstrators zur Herstellung von Sandformen für den Großguss von Offshore Windturbinen Komponenten im 3D Druckverfahren. Der Formenbau in diesem Sektor wurde als Flaschenhals für eine erhöhte Produktion von entsprechenden Turbinenteilen identifiziert. Sowohl in der Ausbringung als auch in der Designfreiheit sind aktuell Grenzen gesetzt. Als Ziel wurde ein Großdrucker konzipiert, der in einem Volumen von 9000x7000x1000mm<sup>3</sup> in der Lage ist, alle notwendigen Formgrößen für die Produktion dieser Gussteile abzubilden.

Das Projekt umfasste notwendige Formstoffversuche, Materialtests, Konzeptstudien, mechanische Konstruktion, Elektrokonstruktion, Anpassung der Druckkopfansteuerung, Softwareentwicklung (sowohl Anwendungssoftware als auch Steuerungssoftware), Inbetriebnahme der Anlage und letztendlich die Implementierung des 3D Druckprozesses auf der Hardware.

Die Verifizierung des Demonstrators wurde über die Produktion eines Abnahmegussteiles zusammen mit einer Partnergießerei durchgeführt. Der Abguss erfüllte in allen Belangen die Erwartungen an die Bauteilqualität und bedeutet einen erfolgreichen Projektabschluss.

## 1.2. Projekt-Voraussetzungen

Die Entwicklung im Bereich der Offshore-Windenergie geht zunehmend in Richtung immer größerer Anlagen. Darüber hinaus steht die Branche unter großem Druck, die politisch gewollten Kostensenkungen zu realisieren. Ein wesentlicher Kostenfaktor bei der Herstellung großer Windkraftanlagen sind die Kosten für die Herstellung großer Eisengussteile. Die Gussformen für diese Komponenten werden gegenwärtig in einem kostspieligen und zeitaufwendigen Verfahren von Hand hergestellt. Die Dabei auftretenden hohen Formtoleranzen erfordern zudem eine aufwendige Nachbearbeitung der Gusskomponenten.

## 1.3. Planung und Ablauf des Projektes

Das Projekt sollte gemäß dem Zuwendungsbescheid von August 2021 zum 01.09.2021 starten und bis Mai 2023 beendet sein. Aufgrund anhaltender Lieferproblematiken, eine Auswirkung der weltweiten Corona Pandemie, wurde das Projekt zweimal kostenneutral verlängert. Die erste Verlängerung wurde zum 30.06.2024 genehmigt, die zweite Verlängerung dann zum 31.03.2025.

Insgesamt gliedert sich das Verbundprojekt in 7 Arbeitspakete, die sich wie folgend aufteilen.

AP1 GE Renewables GmbH

Zugänglichmachen von Vorentwicklungen seitens GE. Produktportfolio an Gussteile sammeln und hieraus die Produktspezifikationen ableiten

AP2 Fraunhofer IGCV

Konstruktion einer Beispielhaften Gussform und Optimierung der Form. Thermische Simulation und Abgleich mit einer Großgießerei in der Praxis.

AP3 voxeljet AG

Konstruktion und Aufbau einer Demonstrationsanlage im Maßstab 1:1.

AP4 Fraunhofer IGCV

Materialentwicklung, Recycling und Test durchführen. Unterstützung durch Großgießerei.

AP5 voxeljet AG

Anpassung der Prozessparameter des Demonstrators

AP6 voxeljet AG /Fraunhofer IGCV

Software Entwicklung der Prozesssoftware, Prozessüberwachung

AP7 voxeljet AG

Management und Koordination des Gesamtprojekts

## 1.4. Angaben zum wissenschaftlichen und technischen Stand

Die konventionelle Herstellung großer Gussformen erfolgt überwiegend manuell und ist geprägt von hohem Arbeitsaufwand, langer Fertigungszeit und begrenzter Maßgenauigkeit. In der Regel werden dafür Negativ- oder Positivmodelle aus Holz, Polystyrol oder Verbundmaterialien verwendet, die anschließend mit sandgebundenen Verfahren – meist unter Einsatz von Furanharz – abgeformt werden. Alternativ findet auch das Lost-Foam-Verfahren Anwendung, bei dem das Modell beim Gießen verbrennt. Beide Methoden sind personalintensiv, führen zu hohen Fertigungskosten und verlangen aufgrund begrenzter Formgenauigkeit große Bearbeitungszugaben.

Als technische Alternative hat sich das Formstofffräsen etabliert. Hierbei werden Formen direkt aus vorgefertigten Sandblöcken mittels CNC-Technologie gefräst. Dieses Verfahren nutzt etablierte Maschinen und Software, erlaubt größere Formen durch Segmentierung und bietet höhere Präzision. Einschränkungen bestehen bei Hinterschnitten sowie dem zusätzlichen Aufwand für das Zusammensetzen mehrerer Segmente.

Ein bedeutender Innovationsschritt stellt das Binderjetting dar, wie es erstmals 2001 von voxeljet eingeführt wurde. Dieses 3D-Druckverfahren erlaubt die direkte Herstellung komplexer Sandformen ohne Modell oder Werkzeug. In dünnen Schichten wird Sand aufgetragen und selektiv mit einem Bindemittel verfestigt. So entstehen hochdetaillierte Formen, die mit konventionellen Verfahren kaum realisierbar wären. Trotz großer Potenziale in der Prototypen- und Kleinserienfertigung ist die Technologie bei Großgussteilen bislang nur eingeschränkt wirtschaftlich nutzbar: Die Bauvolumen marktüblicher Anlagen (z.B. 2 m<sup>3</sup>) sind begrenzt, die Druckgeschwindigkeiten (typisch 80–120 l/h) vergleichsweise niedrig, und große Formen müssen in vielen Einzelteilen gedruckt und manuell zusammengesetzt werden. voxeljet bietet mit der VX4000 eine der größten verfügbaren Anlagen (4 × 2 × 1 m), was einen wichtigen Beitrag zur Skalierung darstellt.

Weitere additive Verfahren – etwa großformatige Betondrucker aus der Bauindustrie oder neuartige zirkulare Drucksysteme – zeigen zwar interessante Konzepte bezüglich Baugröße oder Geschwindigkeit, eignen sich jedoch derzeit nicht für die Herstellung von hochpräzisen Sandformen aufgrund unzureichender Auflösung oder fehlender Materialkompatibilität.

Insgesamt zeigt sich, dass konventionelle Verfahren weiterhin dominieren, während additive Technologien wie das Binderjetting bereits vielversprechende Ansätze bieten – insbesondere für komplexe Geometrien und kürzere Entwicklungszyklen. Für Großgussteile bestehen jedoch nach wie vor technologische und wirtschaftliche Hürden, die durch größere, schnellere und flexiblere 3D-Drucksysteme künftig weiter überwunden werden müssen.

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

#### 2.2.1. Materialentwicklung und Parametersuche (WP5)

Die Materialtests wurden in zwei Abschnitten durchgeführt:

- Definition eines passenden Materialsets und Bestimmung der Druckparameter
- Test des Parameter mittels Testgeometrie und deren Abguss

##### 2.2.1.1. Materialset & Parameter

Über unterschiedliche Testdrucker und Recoatingkonzepte wurden eine Vielzahl von Tests durchgeführt. Es wurden verschiedene Sande in verschiedenen Konfigurationen verwendet.

- FPS850 Furandrucksystem mit Horizontalspaltrecoating (hier wurden parallel auch Versuche auf einer VX200 und VX2000 durchgeführt)
- S15 Furandrucksystem mit Vertikalspaltrecoating

Ein Vertikalspaltrecoater hat einen vertikal nach unten geöffnetem Spalt, durch den er den Sand auf die Druckoberfläche dosiert und mittels einer Klinge glättet.

Ein Horizontalspaltrecoater hat einen Horizontal geöffneten Spalt und dosiert den Sand über einen Absatz der zugleich als Klinge fungiert.

Auf beiden Systemen wurden parallel verschiedenste Kombinationen aus:

- Recoatinggeschwindigkeit
- Schichtstärke
- Klinglefrequenz
- Winkeleinstellung der Klinge
- Eintrag von Harz über den Druckkopf
- Zustellung an Aktivatorflüssigkeit (Säure im Furanharzsystem)
- Aktivatorotyp (Unterschiedliche Lieferanten und Trocknungszeit)

Geprüft wird auf

- Maßhaltigkeit (Testriegel und Testplatten)
- Dichte
- Biegefestigkeit.

Die erreichten Festigkeiten lagen bei bis zu 320 N/cm<sup>2</sup> bei 0,5mm Schichtstärke und 240 N/cm<sup>2</sup> bei 0,7mm, was für erste Tests sehr vielversprechend erschien.

Es wurden Frisch- und Recyklatsande verwendet.

### **2.2.1.2. Erster Testabguss (IGCV WP2)**

Nach Abschluss der Parametertests wurde ein Formsatz aus Rezyklat mit den gefundenen Parametern auf einer der Bestandsanlagen gebaut und für den Abguss beim Fraunhofer IGCV. Zusätzlich wurden hier Test-Geometrien gedruckt, um auch erweiterte Aussagen zur Maßhaltigkeit zu erhalten. Die Maßhaltigkeit konnte über sogenannte Testplatten und anschließenden optischen Scan bestätigt werden.

Der Formsatz wurde vom IGCV datentechnisch vorbereitet, nach Lieferung aufgebaut, mit Sensorik versehen und abgegossen.

Die Abgießbarkeit mit den verwendeten Bauparametern konnte bestätigt werden.

### **2.2.2. Gegenüberstellung polares vs. kartesisches Drucken**

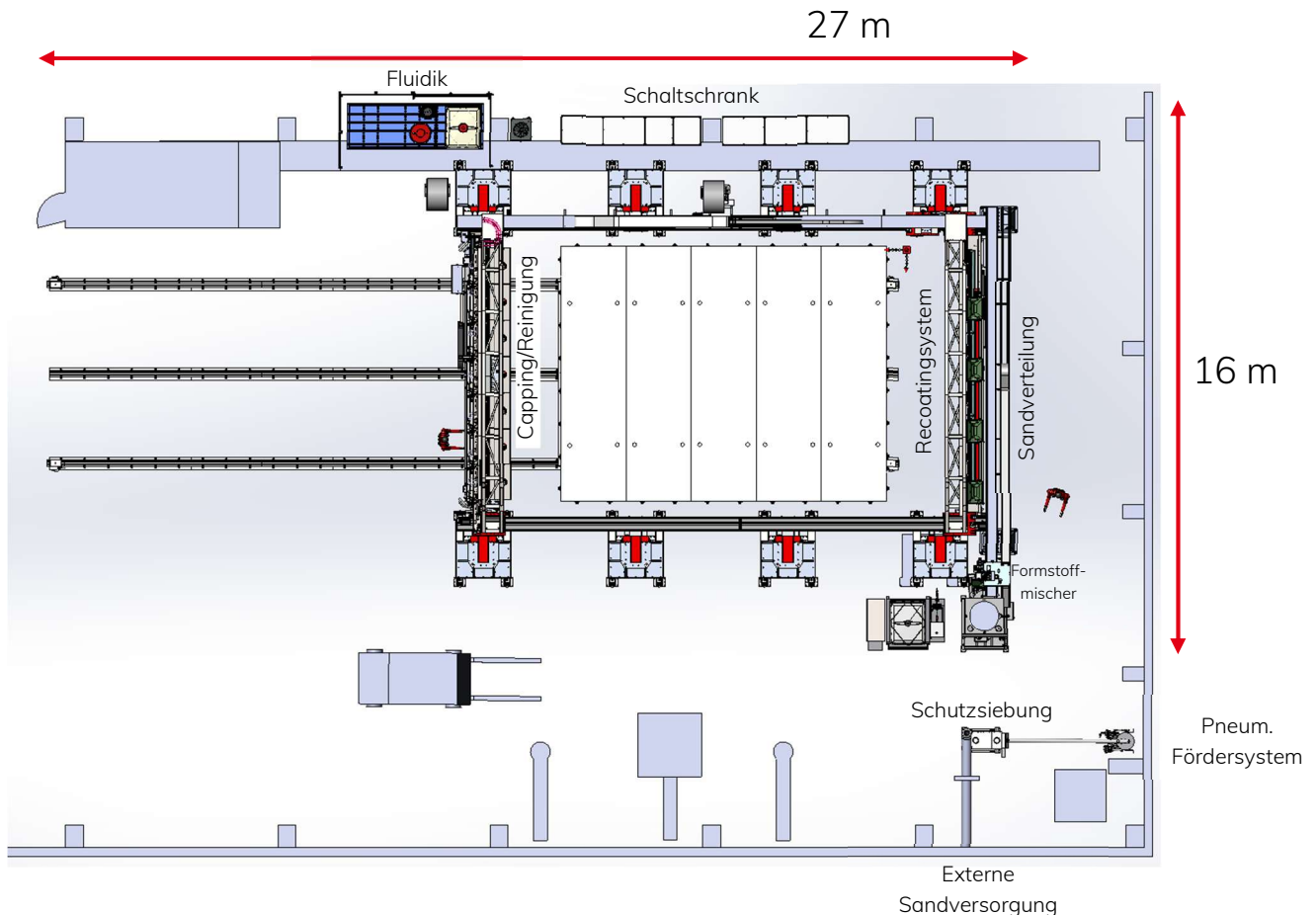
In einem ersten Workshop der Projektpartner bei voxeljet wurden intensiv die Vor- und Nachteile des polaren Druckens gegenüber einer kartesischen Variante beleuchtet. Da im Antrag ursprünglich ein polares Drucksystem geplant wurde, soll im Folgenden die Entscheidungsfindung erläutert werden, die die Änderung des Grundkonzeptes zur Folge hatte.

Die Betrachtungen ergaben deutliche Vorteile auf der Seite des kartesischen Modells. Abgesehen von den Durchsatzvorteilen erschien auch eine Umsetzung der Ziele in der kartesischen Variante bezüglich Maschinenbaues und Software als wesentlich zielführender.

## 2.2.3. Design und Aufbau Demonstrator (WP3)

### 2.2.3.1. Übersicht Gesamtsystem

Das Gesamtsystem erstreckt sich über eine Fläche von 27 x 16 m<sup>2</sup>. Darüber hinaus sind weitere Anlagenteile zur Sandversorgung außerhalb dieses Bereiches angeordnet.



**Abbildung 1 Grundriss des Demonstrators**

Die Platzierung des Gesamtsystem in der Dienstleistungshalle bei voxeljet erfolgte nach Maßgabe des Sand-Materialflusses. In der Abbildung 1 wird in der rechten unteren Ecke eine externes 25 m<sup>3</sup> Hochsilo für die Sandversorgung verwendet (externe Sandversorgung).

Die Bauplattform kann nach Fertigstellung der Baujobs auf Schienen nach links aus der Anlage gefahren werden. Die Entladung der fertigen Bauteile erfolgt dann sicher außerhalb der Anlage mittels Kräne. Elektrik und Fluidversorgung sind oben angeordnet.



Abbildung 2 ACC-Drucker ohne Umhausung bei Inbetriebnahme

### 2.2.3.2. Pylone (Z-Achsen zum Heben der Prozessachsen) (WP3)

Die 3D Druckanlage verfügt über insgesamt 8 unabhängige Pylone, jeweils 4 links und 4 rechts, an denen das Achssystem für Druckkopf und Recoater befestigt ist. Die Pylonen sind baugleich ausgeführt und verfügen über Gestell, Linearführungen, eine Kugelrollspindel, einen Schlitten mit Spindelmutter und einen Servomotor, der über eine Zahnriemenstufe an die Spindel befestigt wird.

### 2.2.3.3. X-Achsen (WP3)

Die X-Achsen tragen den Sand-Beschichter (Recoater), der den Sand schichtweise aufträgt, sowie den Druckkopf mit 7m Breite. Die Achsen sind je 14,5m lang und bauen auf einem Vierkantrohr mit 350mm Kantenlänge auf. Die geforderte maximale Durchbiegung von 0,4mm wurde in FEM-Analysen durch den Zulieferer und voxeljet geprüft und nach Montage der Anlage durch Messung verifiziert.

### 2.2.3.4. Bauplattform (WP3)

Auf der Bauplattform wird im Betrieb der Anlage das eigentliche Druckteil erstellt. Der Unterbau der Schienen wird aus armiertem Beton gefertigt.

Die Notwendigkeit eines Schienensystem ergibt sich aus der Anforderung an die Anlagenverfügbarkeit. In einem späteren Produktionsumfeld muss während der Entladezeit (Nebenzeit) der Plattform bereits die nächste Plattform im Einsatz sein. Im prototypischen Einsatz genügt die Bereitstellung nur einer Plattform, um die Funktion

des Schienensystems zu testen. Die Betonträger für die Stahlschienen wurde nach Ausrichtung mit Spezialbeton untergossen.

Je nach späterem Umfeld und den Aufstellbedingungen kann auch ein anderer Ansatz verfolgt werden. Da zum Entladen der Plattform leistungsfähige Kräne notwendig sind und diese im Gießereiumfeld nicht überall verfügbar sind, kann ein dezentraler Ansatz von Drucker und Entladeplatz eine sinnvollere Variante darstellen.

### **2.2.3.5. Querträger und Y-Achse (WP3)**

Die Anforderung an die Steifigkeit des Querträgers für den Beschichter und Druckkopf stellten sich als Herausforderung heraus. Da durch Abweichungen in dieser Baugruppe direkt die Bauteilqualität und auch die mögliche Baugeschwindigkeit abhängen, wurde hier sehr viel Zeit investiert. Letztendlich konnte die Konstruktion die Anforderungen erfüllen. Der Querträger wurde mit Aufnahmen zur Einstellung der Druckköpfe und der Y-Achse für den Querversatz der Druckköpfe versehen. Ein Längenausgleich auf der X-Achse kompensiert mögliche Ausdehnungseffekte und somit Verspannungszustände im Gesamtsystem.

### **2.2.3.6. Druckkopf (WP3)**

Der Druckkopf als Kernkomponente des Systems stellt durch die großen Abmessungen eine Herausforderung. Zur besseren Wartbarkeit wurde der Kopf in unabhängige 1m Stücke (Einzelköpfe) aufgeteilt, die sich einzeln abnehmen lassen. Es sind nur wenige Verstelleinheiten für Höhe und Winkel der Teilköpfe nötig.

Als Druckmodule werden lösemittelbeständige Industrieköpfe verwendet. Die Haltbarkeit wurde in Langzeittests, während er Konzeptphase geprüft, kann aber nicht abschließend bestätigt werden.

Der Druckkopf bietet die Möglichkeit unterschiedliche Ausbaustufen darzustellen. Je nach Wunsch (Volumenfortschritt vs. Kosten) kann der Kopf in Voll-, Halb oder Viertelbestückung arbeiten.

### **2.2.3.7. Park- und Schutzeinrichtung Druckkopf (Cappingstation) (WP3)**

Die Cappingstation schützt den Druckkopf während Produktionspausen oder Wartungsphasen.

Es handelt sich im Wesentlichen um einen Stempel, der auf die Unterseite des Druckkopfes bewegt wird und ihn vor Schmutz und Austrocknen schützt. Der Aufbau wurde auch hier analog zum Kopf in 1m Stücke aufgeteilt, um eine einfache Wartbarkeit und Montage zu ermöglichen.

### **2.2.3.8. Spitting-/Purgeeinheit (WP3)**

Purge und Spitting sind Teil des Reinigungszyklus. Im Wesentlichen handelt es sich hier um unterschiedliche Auffangeinheiten, die an eine Absaugung angeschlossen wurden.

### **2.2.3.9. Reinigungsstation Druckkopf (WP3)**

Das Konzept der Reinigungsstation entstand durch Weiterentwicklung bekannter Konzepte ergänzt durch die gesammelten Erfahrungen an bestehenden Systemen. Ergänzt wurde das System durch eine Abdeckung, um die Komponente von Staub zu schützen und um eine Absaugung, um Lösemitteldämpfe zu fassen.

Die Tragstruktur für sowohl Cappingstation als auch Reinigungsstation lagert beidseitig auf den Pylonen auf und wird auf gleicher Höhe des Druckkopfes geführt.

#### **Abbildung 3 Reinigungsstation Druckkopf (CAD) und Einbau**

### **2.2.3.10. Fluidsystem**

Für die Fluidversorgung (Cleaner und Binder) wurden Verbrauchsmengen abgeschätzt und ein Plan für die Befüllung des Druckkopfes und der Cleanerversorgung der Reinigungsstationen sowie dem Wechsel der Behälter erstellt. Die Verbräuche aller Flüssigkeiten können gemessen und geloggt werden. Auflagen für die Behandlung von Gefahrstoffen flossen in das Konzept ein. Dies gilt ebenfalls für die Behandlung von Abfallflüssigkeiten.

### **2.2.3.11. Fireboard (Druckdatencontroller)**

Zur Ansteuerung der einzelnen Druckmodule bedarf es eines Systems zur Aufbereitung und Übertragung der Druckdaten an das Druckkopfsystem. Durch die enormen Datenmengen und Übertragungsgeschwindigkeiten wurde eine Anpassung der Übertragungsmedien und Verarbeitungsprozessoren der Fireboards nötig.

### **2.2.3.12. Formstoffmischer und externe Sandversorgung (WP3)**

Aufgrund der Anforderungen, die sich aus der geforderten Bauleistung ergeben und den guten Erfahrungen aus dem Bereich der VX4000 wurde zusammen mit einem Zulieferer Mischsystem und das externe Sandversorgungssystem für die VX9000 projektiert.

Die Versorgung wurde so geplant, dass die Anlage mit BigBags oder einem Silo mit Sand betrieben werden kann. Die Anlage ist auf einen Durchsatz von max. 5t/h Formsand ausgelegt. Die Versorgung mit Aktivator erfolgt- wie in der Industrie üblich- über 1000l IBC Container.

### **2.2.3.13. Sandzuführung (Mischer-Recoater)**

Es wurden hier Fördersysteme auf basierend auf Schnecken und Spiralen diskutiert, allerdings aufgrund der Erfahrungen bei der VX4000 verworfen, da es durch den Gehalt an Feinstaub und flüssigen Stoffen sehr zu Verschmutzung neigt.

Die Zuführung erfolgt über einen schnellen Shuttlebehälter und verschiedene Zwischenbehälter, die letztendlich den Recoater befüllen.

### **2.2.3.14. Recoater (Sandbeschichter)**

Zur Auslegung des Recoaters sind im Rahmen der Formstofftests ausgiebige Versuche zum Ausfluss und den erzielbaren Geschwindigkeiten durchgeführt worden. Siehe

Gleichzeitig wurden verschiedenste Konzepte zu Recoaterverschlüssen diskutiert, aber aus zeitlichen Gründen verworfen. Das Recoaterdesign ist eine angepasste Version eines VX4000 Recoaters, der für höhere Geschwindigkeit und größere Schichtstärken ausgelegt wurde.

Die Abnahmeformen wurde mit einer Schichtstärke von 0,7mm erstellt. Tests mit 1 mm werden folgen.

### **2.2.3.15. Recoaterreinigung**

Da es sich bei dem verwendeten Sand um eine Mischung auf ca. 0,4% Flüssigkeit und Sand handelt, bleiben an dem Recoater unter Umständen Reste von Sand an der Klinge zurück. Es muss in regelmäßigen Abständen eine Reinigung dieser Klinge durchgeführt werden.

Für die Recoaterreinigung wurde ein Konzept mit elektrisch angetriebene Bürsten erstellt. Der überschüssige Sand wird mit Bürsten und einem Trichter aufgefangen und abgefördert.

### **2.2.3.16. Schaltschrank-Elektrik**

Durch die Wahl des Konzeptes der dezentralen Motor- und IO-Ansteuerung war es möglich, nach einer ersten Motorauslegung für die Dimensionierung der Einspeisemodule, den Schaltschrank zu konstruieren, ohne dass die mechanische Konstruktion zuerst durchgeführt werden musste. Nach Auswahl aller weiteren Komponenten wurde der Schaltschrank für die Inbetriebnahme fertiggestellt. Um flexibel auf weitere Anforderungen zu reagieren, wurde genügend Platz für weitere Komponenten vorgesehen. Auch bei einer Weiterentwicklung der Anlage und größerem Änderungsbedarf kann der flexibel den neuen Anforderungen angepasst werden.



**Abbildung 4 Hauptschrank**

### **2.2.3.17. Umhausung**

Für die Umhausung des Demonstrators wurde eine Kombination auf Aluminium-Traversen und Folienbespannung gewählt, die durch ein Sicherheitskonzept auf Basis von Lichtgittern, Metallzäunen und Türen mit Zugangskontrollen ergänzt wird. Es gilt eine Abschirmung der Resthalle vom Produktionsraum darzustellen, um entstehende Harzdämpfe sicher absaugen zu können und die obligatorische Arbeitssicherheit (Zugangsbeschränkung) darzustellen.

### **2.2.3.18. Endmontage (WP3)**

Alle gelieferten Baugruppen wurden vormontiert und gemäß eines Aufbau- und Montageplans zusammengesetzt. Parallel zur Montage wurden einzelne Baugruppe elektrisch integriert, in Betrieb genommen, mit der SPS verknüpft, getestet und später per Prozesssoftware verbunden.

Das gesamte Achssystem wurde mit Hilfe eines externen Dienstleisters per Laser Tracker vermessen und notwendige Justagen durchgeführt.

Um die Verformungen zu überprüfen, wurde in diesem Zuge auch Belastungstests durchgeführt und die zu erwartenden Durchbiegungen bestätigt.

### **2.2.4. SPS Programmierung (WP6)**

Bei der SPS-Programmierung der Anlage wurde auf anderes Schnittstellenkonzept umgestellt. Es dient in erster Linie zur verbesserten Kommunikation zwischen Prozesssoftware (PC) und der SPS und wird zunehmend als Standard in der Industrie verwendet. Alle notwendigen SPS Bausteine wurden angepasst und getestet.

### **2.2.5. UI Programmierung (WP6)**

Die Prozess-Software ProPrint bildet das User-Interface und gleichzeitig die Ablaufsteuerung. Bis auf wenige Ausnahmen werden Prozessschritte über Makros an die SPS der Anlage gesendet und dort ausgeführt. Es wurden hier umfangreiche Anpassungen in der bestehende Software ProPrint durchgeführt, um die neue Kommunikations-Schnittstelle einsetzen zu können. Die notwendigen Makros wurden neu erstellt. Es wurden Leistungstests durchgeführt, um die enormen Datenmengen sicher an die Drucktechnik übertragen zu können. Die Software hat beim Bau der Abnahmeformen Ihre Stabilität bewiesen.

## 2.2.6. Abnahmegussform und Testabguss (WP5)

Eine Partner-Gießerei stellte sich für den Abguss eines großen Gussteiles aus dem Portfolio von GE zur Verfügung. In der folgende Bildsequenz werden die einzelnen Stadien der Produktion des Gussteiles gezeigt.

- Auswahl des Gussteiles und hinzufügen der nötigen Gusstechnik
- Formkonstruktion
- Bau der Formen auf dem Demonstrator
- Entladen der Plattform
- Reinigen der Formen
- Transport zur Gießerei Baettr (Schweden)
- Zusammenbau der Formen
- Abguss
- Entformen
- Fertig gestrahltes Gussteil

### Feedback der Gießerei zur Produktreife der Druckerzeugnisse:

Positiv:

- Hohe Genauigkeit, 1 mm Spaltmaß, stellenweise sind 0,5 mm möglich.
- Sehr gutes Eindringen der Beschichtung in den Sand.
- Festigkeit und Härte des Sandes sind vergleichbar mit Standard Sand.
- Ein Drucktest in der Trennfuge zwischen den Sandblöcken war nicht erforderlich. Alle Sandblöcke wurden in einem Schritt ohne Drucktest zusammengefügt.
- Dichtungsschnüre nur im Bereich der Löcher (spiegelnde Oberflächen).
- Keine Ultraschall-Anzeigen.
- Keine eingebrannten Sandbereiche.
- Nur kleine offene Porositäten im Bereich der Kokillen. Diese können auch bei konventionellen Sandformverfahren auftreten und sind nicht auf die 3D-gedruckte Sandform zurückzuführen.

Negativ

- Der Hebepunkt der Sandblöcke befand sich nicht im Gleichgewicht mit dem Schwerpunkt
- Die Anzahl der Trennfugen kann reduziert und ihre Position optimiert werden

### Fazit

Der Abguss der Formen übertraf die Erwartungen. Präzision liegt -für die Größe der Bauteile- auf höchstem Niveau, die Abgießbarkeit und das Formstoffverhalten sind ohne Abstriche für den Einsatz im Bereich des Großgusses zu verwenden.

## 2.3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die voxeljet AG hat während des gesamten Projektzeitraums Fördermittel in voller Höhe gemäß dem Zuwendungsbescheid erhalten und vollständig ausgeschöpft.

Die Personalkosten stellten dabei den größten Kostenblock im Projekt dar. Insgesamt wurden rund 45.000 Stunden interner Arbeitszeit eingebracht. Die tatsächlichen Aufwendungen lagen leicht über dem ursprünglichen Budget, was vor allem auf einen erhöhten internen Aufwand zur Kompensation externer Engpässe sowie eine unternehmensweite Gehaltserhöhung zurückzuführen ist.

Die Materialkosten überstiegen den Planansatz deutlich. Ursachen hierfür waren vor allem inflationsbedingte Preissteigerungen sowie pandemiebedingte Lieferengpässe. Trotz der Mehrkosten konnten die Projektziele vollständig erreicht werden. Die größten Einzelposten entfielen auf technische Komponenten und Anlagenteile wie Mischsysteme, Pylone, Druckmodule und Steuerungseinheiten.

Auch bei den Fremdleistungen kam es zu einer erheblichen Überschreitung gegenüber der Planung. Aufgrund fehlender interner Kapazitäten wurden externe Dienstleister hinzugezogen, um Verzögerungen im Projektverlauf zu vermeiden. Diese Entscheidung war unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vertretbar, um die geplanten Ergebnisse in der vorgesehenen Zeit zu realisieren.

### 2.2.7. Wirtschaftliche Bewertung

Aufgrund der signifikanten Kostensteigerungen in einzelnen Bereichen übersteigt das Projekt den **Rahmen der bewilligten Fördersumme**. Die voxeljet AG hat hierbei im restlichen Projektverlauf ohne weitere Zuwendungen durch den Fördergeber an einem erfolgreichen Projektabschluss weitergearbeitet.

## 2.4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

### Formstofftests

Die Tests waren wertvolle Informationsquellen für die weitere Entwicklungsarbeit an den einzelnen Baugruppen. Sie lieferten wesentliche Hinweise, für die Ausgestaltung der einzelnen Baugruppen.

### Maschinenbau

Die geforderte Größe, Präzision und Geschwindigkeit machte in fast allen Baugruppen im Vergleich zu Bestandsanlagen ein Umdenken erforderlich und ließ selten Spielraum für Kompromisse. Obwohl es sich um einen Demonstrator handelt, entscheidet die Qualität der Ausführung über Erfolg oder Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne einer Fortführung und Weiterentwicklung des Anlagenkonzeptes. Die erreichte Qualität des Demonstrators und Einsetzbarkeit lassen wenig Wünsche offen.

Auf der Maschinenbauseite sind die Arbeiten nachvollziehbar und den Anforderungen entsprechend.

### Drucktechnik

Auf Seite der Druckdatenverarbeitung wurden erhebliche Anpassungen zur bestehenden Technik notwendig, was zu einem erheblichen Arbeitsaufwand führte. Die Menge an anzusteuernenden Modulen, die Notwendigkeit zusätzliche Features in die Steuerung zu übernehmen (Tropfengröße) und der Umfang der zu übertragenden Daten führte zu einer intensiven Testphase und zu erheblichem Designaufwand.

### Software

Um die Ansteuerung des Druckers zu ermöglichen, wurde ein überarbeitetes Interface-Design nötig. Die Kommunikation der SPS zur Prozesssoftware wird über ein neues Software Interface ermöglicht. Dieses zukunftsweisende Design erforderte ein hohes Maß an Einarbeitung und Tests, da auch beim Zulieferer wenig Erfahrung vorhanden war.

Auch wegen der hohen Datenraten und -volumina, wurden bei der Prozesssoftware in vielen Bereichen Erweiterungen des bestehenden Systems nötig.

### SPS

Gleiches gilt für die SPS, die über diese Schnittstelle mit der Prozesssoftware kommuniziert. Für eine Anlage dieser Größe wurde eine Überarbeitung des Steuerkonzeptes notwendig. Bestehende Softwarebausteine mussten sämtlich überarbeitet werden. Aspekte der Arbeitssicherheit wurden bei der Größe der Anlage an die gesetzlichen Erfordernisse angepasst und implementiert.

## Abguss

Ohne die Bestätigung der Einsetzbarkeit der Formteile direkt beim Kunden, kann der Gesamtprozess nicht validiert werden. Der Abguss erfolgte nach dem Bau und Transport der Abnahmeformen mit einem erheblichen personellen Monitoring-Aufwand

## 2.5. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplans

Der aufgebaute Drucker ist eine hervorragende Basis, die weiteren Ziele wie höhere Geschwindigkeit und hohe Zuverlässigkeit zu erreichen. Der Drucker beweist eindrucksvoll, dass die Produktion sehr großer Bauteile und auch deren Abguss möglich ist. Die Ergebnisse des Abnahmegussteiles sind beeindruckend. Das System erweckt in der gesamten Branche Interesse an der Technologie.

GE als Erstkunde ist nach wie vor an der Verbreitung der Technologie interessiert, hier ist ein weiteres Projekt in der Diskussion, welches die Entwicklung des Druckers bis zu TRL 7 im Einsatz bei einer Großgießerei zum Ziel hat. Der Formenbau als Flaschenhals ist immer noch eine der Flaschenhälse bei der Produktion von Windturbinen. Ein großer Aspekt hier ist die wesentlich einfachere und schnellere Formmontage, die mit deutlich weniger Personaleinsatz auskommt.

Eine Vermarktung an Dritte ist auf Basis des Feedbacks aus dem Markt sehr wahrscheinlich. Mit den gewonnenen Erkenntnissen können kleinere Anlagen als auch – wenn gewünscht- größere Anlagen projektiert werden. Zielgruppen bleiben Energietechnik, Schiffsbau und Automobil. Kunden im Großguss-Bereich wurde mit dem aufgebauten Demonstrator eine völlig neue Möglichkeit aufgezeigt, Kosten zu reduzieren, effizienter auf Kundenforderungen zu reagieren und durch die gewonnene Gestaltungsfreiheit Gussteile zu entwickeln, die über einen reduzierten Material- und Energieeinsatz zu wesentlich nachhaltigeren Produkten führen.

## 2.6. Durchführung des Vorhabens und Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen

Zu Durchführung und Ergebnissen von Teilaspekten des Projektes bei den Projektpartnern werden gesonderte Berichte erstellt.

## 2.7. Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Bisher sind zum Projekt keine Veröffentlichungen zu Projektdetail und Forschungsergebnissen erstellt worden.

Hinweis: Wenn zu Wahrung berechtigter Interessen des ZE oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht zu vertraulich sind, so hat der ZE den ZG darauf hinzuweisen.