Schlussbericht: ACC Projekt (Advanced Casting Cell)

Förderkennzeichen: 03EE3045C

Verbundprojekt:

Additive Herstellung von Gussformen für große Metallgusskomponenten von Offshore-Windkraftanlagen

Teilprojekt:

Entwicklung maschinenbaulicher und softwaretechnischer Grundlagen für eine additive Fertigungsanlage zur Erstellung großer Sandgussformen für Bauteile von Windkraftanlagen

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

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Autor: Leiv Oppel
Datum: 28.11.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzdarstellung 3

1.1 Aufgabenstellung 3

1.2 Projektvoraussetzungen 4

1.3 Planung und Ablauf des Projekts 5

1.4 Angaben zum Stand von Wissenschaft und Technik 7

2. Eingehende Darstellung 8

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen 8

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 16

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 16

2.4 Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 17

2.5. Durchführung des Vorhaben und Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen 17

2.6. Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses 17

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

1. Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Gesamtprojekt bestand in der Entwicklung einer großformatigen 3D-Druckanlage zur Herstellung sehr großer Gießformen. Die folgenden Punkte stellten die zentralen angestrebten Ergebnisse des Projekts dar:

- Auslegung und Konstruktion der Maschine unter Berücksichtigung spezifischer Anforderungen (z. B. Handhabung, Inbetriebnahme, Wartung),
- Definition, Ermittlung und Validierung von Prozessparametern für die Formherstellung,
- Entwicklung und Optimierung des eingesetzten Materialsystems.

Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Teilvorhabens

Im Folgenden werden die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Teilvorhabens beschrieben.

Das Projekt verfolgte das Ziel, das System von einer konzeptionellen Grundidee in eine praxisorientierte, industriell nutzbare Lösung zu überführen. Hierzu wurden die aus der Bedarfsanalyse abgeleiteten Anforderungen in ein grundlegendes, anwendungsorientiertes Lösungskonzept überführt, systematisch dokumentiert und den Verbundpartnern als Planungs- und Entwicklungsgrundlage bereitgestellt.

Da ein wesentlicher Erfolgsfaktor des Gesamtvorhabens in der Akzeptanz der neuen Technologie innerhalb der Lieferkette lag, wurde im Rahmen des Teilvorhabens insbesondere die Integration in bestehende Prozessketten der Gießereien untersucht. Dies umfasste unter anderem:

- die Analyse und Auslegung von Strategien zur Wiederverwendbarkeit des Formsandes,
- die Konzeption und Bewertung von Lösungen für den innerbetrieblichen Transport der gedruckten Sandformen.
- Die Auslegung, Entwicklung und der Bau eines Großdruckers für die Herstellung von Sandgussformen, der den Größen- sowie Qualitätsanforderungen der Windindustrie im Offshore- sowie Onshore-Bereich gerecht wird. Hierzu wurde das Ziel gesetzt, einen 3D-Drucker mit einem Bauvolumen von > 50m³ zu entwiuckeln Diese Größe befähigt den Drucker dazu, für den Formenbau der größten Gussteile einer Offshorewindanlange der aktuellen Turbinengenerationen mit einer Leistung von mehr als 12MW eingesetzt zu werden.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Darüber hinaus sollte das Design der Gusskomponenten (Bauteiltopologie) systematisch an die neuen, durch das ACC bereitgestellten Fertigungsmöglichkeiten angepasst werden. Die angepassten Designs wurden in Form von Testabgüssen experimentell validiert und hinsichtlich Gießbarkeit, Maßhaltigkeit und Werkstoffqualität bewertet.

Ein zentrales Ziel des Projekts war die Sicherstellung der industriellen Verwertbarkeit des entwickelten Systems. Hierfür wurde besonderer Wert auf die präzise Abstimmung und Koordination der einzelnen technischen Arbeitspakete gelegt, was im Rahmen des Programmmanagements strukturiert geplant, überwacht und dokumentiert wurde.

1.2 Projektvoraussetzungen

Die Offshore-Windenergiebranche steht unter großem Druck, die politisch gewollten Kostensenkungen bei der Erzeugung von erneuerbarem Strom zu realisieren. Ein wesentlicher Kostenfaktor bei der Herstellung von großen Windkraftanlagen sind die Kosten für die Produktion von großen Eisengussteilen. Die Formen für diese Komponenten werden derzeit in einem aufwendigen und zeitintensiven Verfahren von Hand hergestellt.

Das Sandbindemittel-Jetting (Sanddruck) ist eine Technologie aus dem Bereich der additiven Fertigung, die die Herstellung von Sandgussformen nicht nur für Prototypen und Kleinserien beschleunigen kann, sondern eventuell auch auf größere Produktionsmengen in Serienfertigungen skaliert werden kann. Bei diesem Verfahren wird eine Sandgussform hergestellt, indem der Formsand schichtweise aufgetragen und anschließend durch Zugabe eines Bindemittels mittels Inkjet-Drucktechnik selektiv verfestigt wird. Nach dem Druckvorgang wird der ungebundene Formsand entfernt, um die endgültige Form zu erhalten. Dieses Verfahren hat das Potenzial, den Zeit- und Kostenaufwand für die Produktion deutlich zu reduzieren und die Reproduzierbarkeit des Formenbaus zu erhöhen. Durch die große Formenvielfalt, die mit diesem Verfahren erreicht werden kann, lassen sich Bauteilgeometrien realisieren, die mit konventionellen Verfahren kaum oder gar nicht realisierbar sind. Dadurch lässt sich das Bauteilgewicht reduzieren, was die Umwelt- und Energiebilanz des Gießereiprozesses sowie der gesamten Windkraftanlage verbessert.

Während diese Technologie bei kleineren Bauteilen bereits ansatzweise etabliert ist, lassen sich Formen für Bauteile in der Größe, wie sie für moderne Offshore-Windkraftanlagen benötigt werden, noch nicht wirtschaftlich herstellen. Aufgrund der begrenzten Größe der auf dem Markt verfügbaren 3D-Drucker für das Sanddruckverfahren musste die Versuchsform (die als Proof of Concept bei einer Gießerei in Deutschland hergestellt wurde) für eine Komponente dieser Turbine aus 72 Teilen auf einem vorhandenen Drucker für den Probelauf zusammengesetzt werden. Aus diesem Grund wurde ein Konzept für einen neuartigen Drucker entwickelt, der aufgrund seiner Bauweise eine besonders effiziente und ressourcenschonende Herstellung solcher Formen ermöglicht.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Dieses Teilprojekt ist Teil eines Verbundprojektes zwischen Industrie- und Forschungspartner aus den Bereichen Windenergie, Gießereitechnik und additiver Fertigung

. Ziel des Verbundprojektes ist es, das Druckverfahren in Form einer prototypischen Demonstrationsanlage so weit zu entwickeln, dass die Machbarkeit einer Serienfertigung von Gießformen für große Eisengussteile nachgewiesen werden kann.

Im vorliegenden Teilprojekt sollen Beiträge zu den schwerpunktmäßigen maschinenbaulichen Grundlagen sowie zur Software- und Verfahrensentwicklung für die Versuchsanlage geleistet werden. Weiterhin sind die Einarbeitung der Kundenanforderungen an die Versuchsanlage und die Spezifika der Versuchsbauteile Teil dieses Teilprojektes.

1.3 Planung und Ablauf des Projekts

Das Projekt sollte gemäß dem Zuwendungsbescheid im Jahr 2021 starten und ursprünglich im Jahr 2023 abgeschlossen werden. Aufgrund anhaltender Lieferengpässe sowie der Auswirkungen externer globaler Ereignisse wurde das Projekt im weiteren Verlauf kostenneutral verlängert. Infolge dieser Rahmenbedingungen ergaben sich Anpassungen im zeitlichen Ablauf des Vorhabens.

Zusätzlich zu den zeitlichen Verschiebungen kam es bei einem industriellen Projektpartner zu organisatorischen und wirtschaftlichen Veränderungen, die Einfluss auf die Durchführung des Projekts hatten. In der Folge wurde das Projekt inhaltlich angepasst und auf kleinere Gussteile fokussiert, während der ursprünglich geplante Umfang entsprechend reduziert wurde. Zudem wurde der Beitrag dieses Projektpartners auf begleitende und beratende Tätigkeiten konzentrierte.

Insgesamt gliederte sich das Verbundprojekt in sieben Arbeitspakete, die die verschiedenen technischen und organisatorischen Aspekte des Vorhabens abdeckten.

Arbeitspaket 1

In diesem Arbeitspaket wurde der vorhandene Wissensstand eines industriellen Partners systematisch in den Projektverbund eingebracht. Die aus vorangegangenen Entwicklungsaktivitäten gewonnenen Erkenntnisse aus Konstruktion und ersten Tests wurden aufbereitet, dokumentiert und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Auf dieser Grundlage konnten Anforderungen an die additive Fertigungsanlage abgeleitet werden, unter anderem hinsichtlich maximaler Bauteil- und Formabmessungen, Formgenauigkeit, Handhabung, innerbetrieblichem Transport sowie der Integration in bestehende Gießereiprozesse. Aufbauend darauf wurden Prozesse und Integrationskonzepte für den Einsatz der Technologie im industriellen Umfeld entwickelt.

Arbeitspaket 2

In diesem Arbeitspaket wurde eine beispielhafte Gussform konstruiert und mittels mechanischer Simulationen untersucht. Ziel war es, Kenngrößen wie maximale Materialbelastungen zu bestimmen und daraus Anforderungen an die Materialeigenschaften der Sandform abzuleiten.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Ergänzend wurden thermische Simulationen des Gießprozesses durchgeführt, um das Form- und Bauteildesign unter gießtechnischen Gesichtspunkten zu bewerten.

Arbeitspaket 3

Gegenstand dieses Arbeitspakets war die Entwicklung und der Aufbau einer prototypischen Demonstrationsanlage im Maßstab 1:1. Hierfür mussten verschiedene Subsysteme neu entwickelt sowie bestehende Komponenten an die besonderen Anforderungen der großformatigen Anlage angepasst werden, insbesondere im Hinblick auf Baugröße und das eingesetzte Druckkonzept.

Arbeitspaket 4

In diesem Arbeitspaket erfolgte die materialtechnische Entwicklung. Auf Basis der zuvor abgeleiteten Anforderungen wurden unterschiedliche Materialkombinationen aus Sand, Bindemittel und Aktivator bewertet und experimentell getestet. Darüber hinaus wurden Konzepte zur Wiederverwendung des verwendeten Formsandes untersucht. Falls eine Wiederverwendung im additiven Prozess nicht möglich war, wurde der Einsatz des Materials in konventionellen Gießereiprozessen betrachtet.

Arbeitspaket 5

Hier wurde der Druckprozess an die Eigenschaften der Demonstrationsanlage angepasst. Dies umfasste unter anderem die Festlegung geeigneter Schichtdicken sowie die Auslegung des Sandschichtauftrags. Die ermittelten Prozessparameter wurden experimentell validiert, um eine stabile und reproduzierbare Formherstellung sicherzustellen.

Arbeitspaket 6

In diesem Arbeitspaket wurde die Steuerungs- und Prozesssoftware für die additive Fertigungsanlage entwickelt. Ergänzend wurden Anforderungen an eine Online-Prozessüberwachung definiert und umgesetzt, um eine gleichbleibend hohe Qualität der gedruckten Sandformen sicherzustellen. Parallel dazu wurden neue Ansätze zur Prozessüberwachung untersucht und praktisch erprobt.

Arbeitspaket 7

Das Projektmanagement umfasste die Planung und Koordination des Gesamtvorhabens, die Abstimmung zwischen den Arbeitspaketen und Projektpartnern, das Risikomanagement sowie die fortlaufende Dokumentation der Projektergebnisse.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

1.4 Angaben zum Stand von Wissenschaft und Technik

Additive Fertigungsverfahren werden seit mehreren Jahren als potenziell disruptive Technologie für die Herstellung von Gussformen betrachtet, insbesondere im Kontext steigender Anforderungen an Flexibilität, Durchlaufzeit und Prozessstabilität. In der industriellen Praxis ist der konventionelle Sandguss nach wie vor das vorherrschende Fertigungsverfahren für große metallische Strukturbauteile. Dieses Verfahren zeichnet sich durch einen hohen manuellen Aufwand im Formenbau sowie in der Nachbearbeitung der Gussteile aus.

Im konventionellen Sandguss ist der Formenbau überwiegend handwerklich geprägt. Dies ist im Wesentlichen auf historisch gewachsene Prozessstrukturen, eine hohe Variantenvielfalt der Bauteile sowie die starke Abhängigkeit von erfahrungsbasiertem Fachwissen zurückzuführen. Die Herstellung der Gießformen erfolgt in der Regel auf Basis physischer Modelle aus Holz, Kunststoff oder Metall, die in Formkästen mit Formsand eingebettet werden. Der Sand wird manuell eingebracht und verdichtet, das Modell von Hand entformt und Anguss- sowie Speisersysteme werden häufig manuell in die Form integriert oder angepasst. Gießkerne werden separat gefertigt, getrocknet, transportiert und manuell in die Form eingelegt. Abschließend werden die Formhälften ausgerichtet, zusammengefügt und für den Gießprozess vorbereitet.

Der hohe Anteil manueller Arbeitsschritte führt zu einer begrenzten Automatisierbarkeit des Prozesses und zu einer starken Abhängigkeit von qualifiziertem Personal. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Abhängigkeit von physischen Modellen und Schablonen. Für jede neue Bauteilgeometrie müssen diese Modelle neu hergestellt, angepasst oder instandgesetzt werden. Änderungen im Bauteildesign erfordern daher nicht nur Anpassungen der digitalen Konstruktionsdaten, sondern in der Regel auch manuelle Nacharbeiten an den Modellen. Dieser Medienbruch zwischen digitaler Konstruktion und physischer Formherstellung verhindert eine durchgängige Digitalisierung und Automatisierung der Prozesskette.

Darüber hinaus sind die Geometrien von Formen, Anguss- und Speisersystemen traditionell so ausgelegt, dass sie mit handgeführten Werkzeugen gefertigt und angepasst werden können. Viele Bereiche der Form sind schwer zugänglich oder geometrisch komplex, sodass standardisierte Bearbeitungswerkzeuge und automatisierte Verfahren an ihre Grenzen stoßen. Dies führt zu einer weiteren Einschränkung der Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit.

Ein zusätzlicher manueller Aufwand entsteht in der Nachbearbeitung der rohen Gussteile. Diese Nacharbeiten dienen dazu, gießtechnische Hilfsstrukturen und Formstoffreste zu entfernen, handhabungssichere Oberflächen und Kanten herzustellen, potenzielle Fehler frühzeitig zu erkennen sowie definierte Bezugsflächen für die nachfolgende mechanische Bearbeitung zu schaffen. Erst auf dieser Basis kann eine wirtschaftliche und prozesssichere Zerspanung erfolgen.

Zusammenfassend führt der hohe Arbeitsaufwand im konventionellen Sandguss zu strukturellen Nachteilen für Produktionsstandorte mit hohen Lohnkosten. Neben Materialkosten und verfügbaren Produktionskapazitäten ist dies ein wesentlicher Faktor, der die Wettbewerbsfähigkeit lokaler Gießereien beeinflusst und die Attraktivität einer regionalen Fertigung begrenzt.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Die additive Fertigung von Sandgussformen ermöglicht demgegenüber einen deutlich höheren Automatisierungsgrad. Durch die direkte Umsetzung digitaler Konstruktionsdaten in physische Formen wird der Medienbruch zwischen Konstruktion und Fertigung reduziert. Gleichzeitig lassen sich komplexe Geometrien ohne zusätzlichen manuellen Aufwand realisieren, was neue Freiheitsgrade im Formen- und Bauteildesign eröffnet.

Darüber hinaus bietet die additive Fertigung eine erhöhte Prozessflexibilität und trägt zur Reduzierung von Beschaffungs- und Abhängigkeiten bei. Durch die Möglichkeit, Formen dezentral und bedarfsgerecht herzustellen, können Lieferketten robuster gestaltet und Produktionsrisiken reduziert werden. Insbesondere für Regionen mit hohen Personalkosten ergeben sich dadurch neue Optionen, lokale Produktionsstrukturen wirtschaftlich zu betreiben und gleichzeitig kurze Lieferwege zum Endanwender zu realisieren.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

Wie bereits einleitend dargestellt, haben sich im Verlauf organisatorische Änderungen ergeben, die den weiteren Beitrag auf das Projekt auf eine notwendiges Maß reduziert haben. Dieser Beitrag beschränkte sich daher auf eine begleitende und beratende Mitwirkung am Projektverlauf. Im Folgenden werden die inhaltlichen Beiträge dieses Partners zum Gesamtprojekt zusammengefasst.

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets wurden vorhandene Erfahrungen im Bereich additiver Fertigungsverfahren innerhalb des Projektkonsortiums geteilt. In mehreren vorangegangenen Untersuchungen zu additiven Fertigungstechnologien wurde festgestellt, dass der Sandbinder-Jetting-Prozess ein besonders hohes Anwendungspotenzial für großformatige Metallgusskomponenten besitzt. Im Vergleich zu direkten metalladditiven Verfahren bleibt der eigentliche Gießprozess im Wesentlichen unverändert, während insbesondere der Prozess der Formherstellung und des Formdesigns signifikant weiterentwickelt werden kann.

Zu den identifizierten Vorteilen zählen eine Vereinfachung des Gesamtprozesses, eine deutliche Verkürzung der Durchlaufzeiten sowie die Möglichkeit, sehr komplexe Geometrien zu realisieren, die mit konventionellen Verfahren nur eingeschränkt umsetzbar sind. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde über mehrere Jahre hinweg eine schrittweise technologische Weiterentwicklung des additiven Formenbaus verfolgt, um dessen Potenzial systematisch zu evaluieren.

wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

In frühen Entwicklungsstufen wurden zunächst grundlegende Untersuchungen an kleineren Testgeometrien durchgeführt, um Erkenntnisse zu strukturellen Belastungen, hydrostatischen Druckverhältnissen und der Stabilität additiv gefertigter Sandformen zu gewinnen. Darauf aufbauend folgten Untersuchungen an skalierten und später an großformatigen Gusskomponenten, um die Übertragbarkeit der Technologie auf industrielle Anwendungen zu bewerten. Parallel dazu wurden wirtschaftliche Betrachtungen angestellt, um das Kostenpotenzial des additiven Formenbaus im Vergleich zu konventionellen Verfahren einzuordnen.

Ergänzend wurden additive Fertigungsverfahren auch in anderen Anwendungsbereichen erprobt, um Erfahrungen unter realen Produktionsbedingungen zu sammeln und die Prozessvorteile in industriellen Umgebungen zu validieren. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse bildeten eine wesentliche Grundlage für die Konzeption des im Projekt verfolgten Anlagen- und Prozesskonzepts.

Auf Basis dieser Vorarbeiten wurden im Rahmen des Projekts bestehende technologische Risiken des Sandbinder-Jetting-Prozesses identifiziert. Diese betrafen insbesondere den hohen Montageaufwand bei stark segmentierten Formen, logistische Risiken beim Transport großformatiger Formteile, die begrenzte Verfügbarkeit geeigneter Anlagen sowie Einschränkungen hinsichtlich Baugröße und Prozessgeschwindigkeit bestehender Systeme.

Das im Projekt entwickelte Anlagenkonzept zielte darauf ab, diese Risiken durch eine Skalierung der Anlagentechnik, eine Reduzierung der notwendigen Formsegmentierung sowie eine verbesserte Integration des additiven Formenbaus in den Gießereiprozess zu adressieren. Durch die Nähe von Formenherstellung und Gießprozess sollte zudem eine höhere Prozesssicherheit erreicht und die Reaktionsfähigkeit bei formbedingten Anpassungen verbessert werden.

Im weiteren Projektverlauf wurden Anforderungen aus Engineering-, Fertigungs- und Lieferkettenperspektive zusammengeführt und zur Spezifikation der Demonstrationsanlage genutzt. Hierzu zählten unter anderem Aspekte der Maschinenkonfiguration, der Flächenanforderungen, des Druckkonzepts sowie des Materialeinsatzes. Die Bewertung dieser Anforderungen erfolgte auf Basis technischer Analysen und qualitativer wirtschaftlicher Betrachtungen.

Darüber hinaus wurden Gießversuche mit additiv gefertigten Sandformen durchgeführt, um die Eignung des entwickelten Prozesses für großformatige Gusskomponenten zu validieren. Die hierbei hergestellten Gussteile zeigten eine gute Maßhaltigkeit sowie eine insgesamt hohe Oberflächen- und Werkstoffqualität. Visuelle Inspektionen und zerstörungsfreie Prüfungen bestätigten die grundsätzliche Eignung des Verfahrens für industrielle Anwendungen.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bestätigten die technische Machbarkeit des additiven Formenbaus für großformatige Gusskomponenten. Gleichzeitig wurden Randbedingungen identifiziert, unter denen eine wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens möglich erscheint. Insbesondere zeigte sich, dass ein optimal integrierter Prozessablauf mit möglichst geringer

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Segmentierung der Formen entscheidend für die Realisierung des vollen Potenzials der Technologie ist.

Sandbinderjet – aktuelle Technologierisiken	ACC-Verbesserungen
Sehr hohe Kosten für die Anwendung	Senkt die Kosten durch Reduzierung des Arbeitsaufwands, Erhöhung der Kapazität, kürzere Durchlaufzeiten und schnelleres Bearbeiten des Gussstücks.
Riskanter Transport durch den Lieferanten	ACC wird im Werk der Gießerei installiert und intern genutzt.
Begrenzte Verfügbarkeit von Maschinen weltweit.	Jede Gießerei wird ihre eigene Anlage haben.
Arbeitsintensive Montage	Minimierung der Formteile, Gestaltungsfreiheit der Merkmale zur Erleichterung der Montage
Aufbau von Montagetoleranzen	Weniger Bauteile und einfache Montage
Bestehende SandBinderJet-Maschinen haben einen zu kleinen Bauraum für die Anwendung.	Systemgröße auf Wind-Gussteile skaliert. Fähigkeit große Sandformteile zu drucken
Bruch eines Formabschnitts bedeutet Stillstand der Formmontage, bis ein Ersatz eintrifft.	Die ACC wird in der Fertigung verfügbar sein, um schnell und effizient einen Ersatz zu erstellen.
Langsame Druckgeschwindigkeit für die Anwendung (128 L/Std.)	Signifikant erhöhte Druckgeschwindigkeit gegenüber Stand der Technik ermöglichen den Bau einer Form für ein 60-Tonnen-Bauteil innerhalb weniger Tage

Abb. 1: Verbesserung durch ACC ggü. bestehendem Sandbinderjet-Prozess

Einsparung und Nutzen von ACC

Das im Projekt verfolgte Konzept des additiven Formenbaus besitzt das Potenzial, durch die Einführung einer neuartigen Fertigungstechnologie wesentliche Verbesserungen in der Herstellung großformatiger Gusskomponenten zu erzielen. Die erwarteten Effekte betreffen insbesondere Qualität, Kostenstruktur, Produktionskapazität, Arbeitsbedingungen sowie ökologische Aspekte.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Potenzielle Effizienzgewinne ergeben sich insbesondere im Formenbau und in der nachgelagerten Bearbeitung. Durch den hohen Automatisierungsgrad des additiven Verfahrens kann der manuelle Arbeitsaufwand im Formenbau deutlich reduziert werden. Auch in der manuellen Nachbearbeitung von Gussteilen ergeben sich Reduktionspotenziale, da formbedingte Abweichungen und gießtechnische Hilfsstrukturen verringert werden können.

Kapazitätsbezogene Vorteile zeigen sich unter anderem in nachfolgenden Prozessschritten wie der mechanischen Bearbeitung und der Abkühlphase. Eine verbesserte Form- und Bauteilgeometrie kann zu einer Reduzierung überschüssigen Materials sowie zu geringeren Rüstzeiten führen. Darüber hinaus lassen sich durch eine gezielte Gestaltung der Formen kürzere Abkühlzeiten realisieren, was die Durchlaufzeiten insgesamt verkürzt.

Qualitative Verbesserungen ergeben sich durch die erhöhte Reproduzierbarkeit des digitalen Formenbaus. Die Reduktion manueller Arbeitsschritte trägt dazu bei, potenzielle Fehlerquellen zu minimieren. Gleichzeitig ermöglicht die direkte Umsetzung digitaler Konstruktionsdaten eine verbesserte Maßhaltigkeit der Gussteile sowie ein agiles Änderungsmanagement, bei dem Anpassungen am Formdesign kurzfristig umgesetzt werden können.

Im Projektverlauf wurden aktualisierte Anforderungen aus Engineering-, Fertigungs- und Lieferkettenperspektive kontinuierlich in die Entwicklung eingebracht. Diese umfassten unter anderem Erkenntnisse aus der Bauteil- und Formkonstruktion, Anforderungen an die Prozessintegration sowie Randbedingungen aus der industriellen Anwendung. Die Analyse dieser Anforderungen diente als Entscheidungsgrundlage für die Auslegung und Weiterentwicklung des Anlagen- und Prozesskonzepts.

Ein enger Austausch mit industriellen Gießereipartnern ermöglichte es, praxisnahe Fragestellungen zu adressieren. In gemeinsamen Abstimmungen und Workshops wurden Aspekte des Gießprozesses, der Materialcharakterisierung, der Arbeits- und Umweltschutzanforderungen sowie der Layout- und Prozessgestaltung in der Gießerei untersucht. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Interaktion des additiven Formenbaus mit bestehenden Produktionsabläufen und der Belegschaft.

Auf dieser Basis wurden unterschiedliche Layout- und Integrationskonzepte für den Einsatz der additiven Fertigungsanlage in einer Gießerei entwickelt und bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen direkt in die Weiterentwicklung des Maschinendesigns und der Prozesskonzepte ein und konnten darüber hinaus auch für weiterführende Analysen in unterschiedlichen industriellen Umgebungen genutzt werden.

Zur Einordnung der wirtschaftlichen Auswirkungen wurde der additive Formenbau in ein bestehendes, prozessübergreifendes Kostenmodell integriert, das alle relevanten Schritte von der Materialbereitstellung über den Gieß- und Bearbeitungsprozess bis hin zu nachgelagerten Arbeitsschritten berücksichtigt. Die Bewertung erfolgte auf qualitativer Basis und diente primär der Abschätzung von Potenzialen und Sensitivitäten. Die Ergebnisse zeigten, dass der additive Formenbau unter geeigneten Randbedingungen ein relevantes wirtschaftliches Potenzial besitzt.

wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Im Hinblick auf die ökologische Bewertung von Gusskomponenten und den Einfluss additiver Technologien im Formenbau wurde im Projekt eine Lebenszyklusanalyse eines repräsentativen Gussteils durchgeführt. Die Betrachtung erstreckt sich über mehrere Prozessschritte entlang der Wertschöpfungskette, beginnend bei der Formenherstellung und dem Gießprozess bis hin zu nachgelagerten Transport- und Bereitstellungsschritten. Als Referenz diente ein konventioneller Herstellungsprozess, dem ein Szenario mit additiv gefertigtem Formenbau gegenübergestellt wurde.

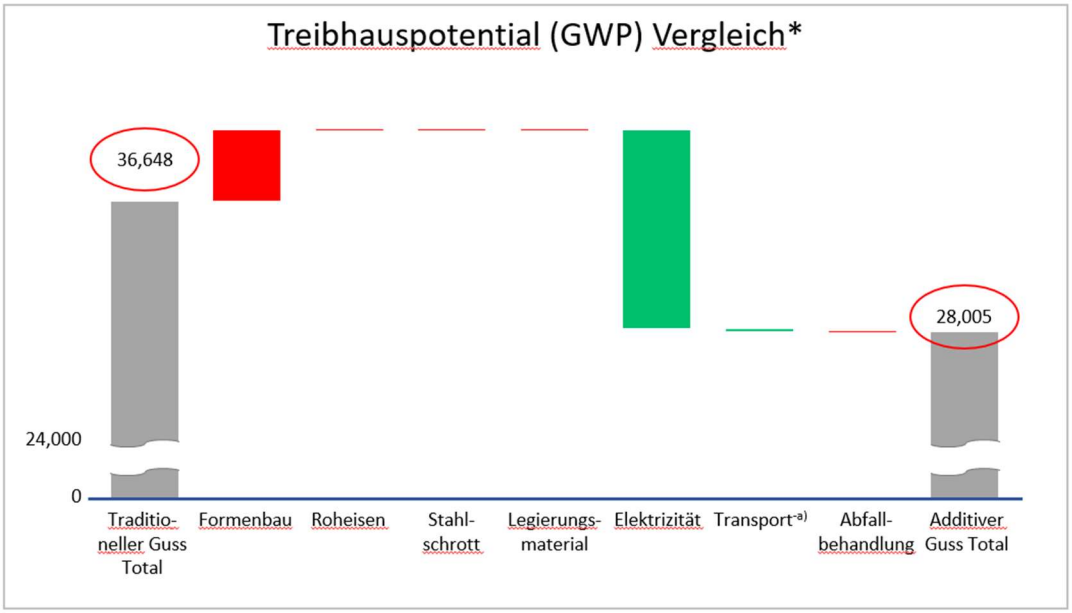
Die Analyse basiert auf dem Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP), einer etablierten Kennzahl zur Bewertung der relativen Klimawirkung verschiedener Treibhausgase. Als Bezugsgröße dienen dabei CO_2-Äquivalente (CO_2-eq), welche die Klimawirkung unterschiedlicher Emissionen vergleichbar machen. So entspricht beispielsweise die Emission eines bestimmten Anteils eines anderen Treibhausgases einem Vielfachen der Klimawirkung von Kohlendioxid.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass der Einsatz additiver Fertigungstechnologien im Formenbau unter geeigneten Randbedingungen zu einer Reduktion des treibhausrelevanten Fußabdrucks führen kann. Die Verteilung der Einflussgrößen verdeutlicht, dass insbesondere die Formenherstellung sowie der hierfür erforderliche Energieeinsatz einen wesentlichen Beitrag zur Gesamtbilanz leisten.

Ein zentraler Einflussfaktor ist der Ersatz manueller, arbeitsintensiver Prozessschritte im konventionellen Formenbau durch einen automatisierten additiven Fertigungsprozess. Darüber hinaus wirken sich Unterschiede in der Energieversorgung und im eingesetzten Strommix auf die ökologische Gesamtbewertung aus, da der Energiebedarf der additiven Fertigung maßgeblich zur Klimabilanz beiträgt.

Der Beitrag logistischer Prozessschritte zur Gesamtwirkung fällt im Vergleich dazu gering aus. Insgesamt unterstreichen die Ergebnisse der Analyse, dass der additive Formenbau nicht nur aus technischer und wirtschaftlicher Sicht, sondern auch unter ökologischen Gesichtspunkten ein relevantes Potenzial besitzt, sofern geeignete Rahmenbedingungen gegeben sind.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.



**Die Ergebnisse beinhalten kein Harz und keinen Katalysator. Die Modellierung der Materialzusammensetzung dieser Komponenten ist nicht betrachtet worden. Es wird nicht erwartet, dass sich die Schlussfolgerungen dadurch ändern.*

Abb. 2: Einfluss von ACC auf Treibhauspotential von Windturbinen-Gussteile

Der GWP-Vorteil aufgund von additiver Fertigung beträgt 23%. Die Verteilung über die unterschiedlichen Einflussgrößen ist im Graphen dargestellt. Zwei Schwerpunkte sind zu erkennen.

Arbeitspaket 2:

Erstes Formdesign-Beispielteil (AP 2.8)

Die Mitglieder des Projektkonsortiums kamen zu dem Ergebnis, dass ein Wärmemodultest erforderlich ist, um ausreichende Daten für die Materialcharakterisierung additiv gefertigter Sandformen zu gewinnen. Die betrachtete Sandform wurde aus einer Kombination aus wiedergewonnenem Formsand und einem organischen Bindemittelsystem hergestellt. Auf dieser Basis wurde ein erster Entwurf einer Gussform erarbeitet, der zu einem späteren Zeitpunkt additiv gefertigt und abgegossen werden sollte, sobald die erforderliche Gießinfrastruktur zur Verfügung stand.

Ein weiterer Schwerpunkt lag in der engen Zusammenarbeit mit gießereitechnischen Experten aus dem wissenschaftlichen Umfeld, um ein vorläufiges Formdesign für eine großformatige Wellen- bzw. Strukturkomponente zu entwickeln. Diese Musterform orientierte sich in wesentlichen Punkten an etablierten Prinzipien des konventionellen Formdesigns und diente zugleich als Referenz für die Weiterentwicklung additiv optimierter Formen im Rahmen des Projekts.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Gießversuche (AP 2.10)

Zur Durchführung der Gießversuche wurde ein industrieller Gießereipartner als Unterauftragnehmer in das Projekt eingebunden. Die Gießversuche sowie der finale Abguss wurden in Zusammenarbeit mit diesem Partner durchgeführt. Der Testguss konnte erfolgreich abgeschlossen werden und lieferte wichtige Erkenntnisse zur Eignung der additiv gefertigten Sandformen unter realen Gießbedingungen.

HalX / ONW Gussteilerzeugung (AP 2.11)

Im weiteren Projektverlauf ergab sich die Möglichkeit, aus einem erweiterten Spektrum geeigneter Bauteile eine repräsentative Gusskomponente auszuwählen. In Abstimmung innerhalb des Konsortiums wurde entschieden, den finalen Testabguss auf eine großformatige Strukturkomponente aus dem Onshore-Bereich zu fokussieren. Die Herstellung dieses Gussteils wurde erfolgreich abgeschlossen und diente als wesentlicher Validierungsschritt für den entwickelten Prozess.

Topologie-Optimierung des Formenfortschritts (AP 2.12)

Parallel zu den experimentellen Arbeiten wurde ein softwaregestützter Ansatz zur Topologieoptimierung von Sandformen untersucht. Ziel war es, Methoden und Werkzeuge für eine effiziente Konstruktion additiv gefertigter Formen zu definieren. Die in Arbeitspaket 2.8 entwickelte Musterform diente dabei als Ausgangspunkt für die Untersuchungen.

Ein zentrales Risiko, das frühzeitig in Gesprächen mit industriellen Gießereipartnern identifiziert wurde, betraf die strukturelle Auslegung additiv gefertigter Sandformen. Insbesondere die Handhabung der gedruckten Formen während des innerbetrieblichen Transports sowie beim Heben stellte hohe Anforderungen an die mechanische Stabilität der Form. Die Herausforderung bestand darin, eine ausreichend robuste Sandform zu konstruieren, die den beim Transport und Handling auftretenden Kräften standhält.

Der untersuchte Topologieoptimierungsansatz verfolgt das Ziel, den Materialeinsatz innerhalb der Formgeometrie auf das notwendige Minimum zu reduzieren, während die strukturellen Anforderungen weiterhin erfüllt werden. Hierzu wurden zunächst die maßgeblichen mechanischen Lastfälle isoliert und der Fokus auf eine Reduktion des Bindemittelanteils gelegt. In einer ersten Phase wurde eine rein strukturelle Analyse ausgewählter Formbereiche durchgeführt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen waren weiterführende Untersuchungen vorgesehen, unter anderem zur Berücksichtigung hydrostatischer Drücke und thermischer Effekte aus Gießsimulationen.

Die ersten Evaluierungen zeigten, dass durch den Einsatz topologieoptimierter Strukturen eine signifikante Reduktion des Bindemittelbedarfs möglich ist. Diese Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die strukturelle Auslegung für Transport- und Handhabungslasten und berücksichtigen noch keine gießtechnischen oder thermischen Randbedingungen.

wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

Im weiteren Projektverlauf wurden die Arbeiten an diesem Ansatz aufgrund organisatorischer Rahmenbedingungen nicht fortgeführt. Die Topologieoptimierung fand daher im finalen Abguss keine Anwendung, und das Bauteil wurde auf Basis des zuvor entwickelten konventionellen Formdesigns hergestellt.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Verlauf des Projekts wurde freiwillig auf die Inanspruchnahme öffentlicher Fördermittel verzichtet. Entsprechend wurden keine Fördermittel abgerufen oder ausgezahlt. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf die Darstellung eines zahlenmäßigen Nachweises verzichtet.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ziel des Projekts war es, durch die Anwendung additiver Fertigungstechnologien im Formenbau eine wesentliche technische Innovation für die industrielle Herstellung großformatiger Eisengussteile im Kontext der Windenergietechnik zu schaffen. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung und Erprobung eines additiven Fertigungsprozesses, der den hohen geometrischen, mechanischen und prozesstechnischen Anforderungen dieser Bauteile gerecht wird.

Die im Rahmen des Projekts hergestellten additiv gefertigten Sandformen sowie die daraus erzeugten Gussteile bestätigen die Angemessenheit der geleisteten Arbeiten. Das ursprüngliche Projektziel bestand darin, eine Gussform mit einer möglichst geringen Anzahl von Einzelteilen unter Verwendung des entwickelten Anlagenkonzepts herzustellen. Aufgrund der Rahmenbedingungen während der Projektumsetzung mussten die Formen in mehreren, logistisch optimierten Segmenten gefertigt werden. Zudem wurde das hergestellte Gussteil nicht in voller Originalgröße, sondern in einer skalierten Variante realisiert, um zusätzliche Investitionen außerhalb des Projektumfangs zu vermeiden.

Trotz dieser Einschränkungen konnte mit der gewählten Skalierung die grundsätzliche Eignung des additiven Formenbaus für komplexe und großformatige Gusskomponenten erfolgreich validiert werden. Das erzielte Gussergebnis überzeugte sowohl hinsichtlich der Maßhaltigkeit als auch der Oberflächenqualität. Es wurden keine signifikanten formbedingten Fehler festgestellt, und durchgeführte zerstörungsfreie Prüfungen ergaben keine relevanten Auffälligkeiten.

Nicht alle Annahmen zur Wirtschaftlichkeit konnten im Rahmen des Projekts vollständig verifiziert werden, da der Versuchsaufbau zusätzliche, im industriellen Serienprozess nicht notwendige Prozessschritte erforderte. Insbesondere der segmentierte Formenbau und der räumlich getrennte Ablauf von Formenherstellung und Gießen führten zu einem erhöhten Aufwand. In einem ideal integrierten Prozessdesign würden diese Zusatzschritte entfallen, wodurch weitere Effizienzpotenziale erschlossen werden können.

Die im Projekt herangezogenen qualitativen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen basieren daher auf einem optimierten Prozessablauf, der eine enge Verzahnung von additivem Formenbau und Gießprozess vorsieht. Die weitere Validierung dieser Annahmen ist Gegenstand zukünftiger Entwicklungs- und Industrialisierungsaktivitäten.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.

2.4 Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Projekt entwickelte additive Fertigungsanlage bestätigt die Annahme, dass additive Technologien im Formenbau für großformatige Gusskomponenten einen wesentlichen technologischen Fortschritt darstellen. Durch die Kombination aus erhöhter Flexibilität, reduziertem manuellem Aufwand und verbesserter Prozessintegration bietet der additive Formenbau das Potenzial, die Wettbewerbsfähigkeit von Gießereien in Hochlohnregionen nachhaltig zu stärken.

Insbesondere die Möglichkeit, Gussformen bedarfsgerecht und in räumlicher Nähe zum Gießprozess herzustellen, eröffnet neue Optionen für eine resiliente und anpassungsfähige Produktionsstruktur. Dies trägt dazu bei, logistische Aufwände zu reduzieren und die Abhängigkeit von komplexen Lieferketten zu verringern. Gleichzeitig ermöglicht die digitale Prozesskette eine schnellere Umsetzung von Designänderungen sowie eine verbesserte Reproduzierbarkeit der gefertigten Formen.

Die Projektergebnisse haben die Überzeugung gestärkt, dass der additive Formenbau eine Schlüsseltechnologie für eine industrielle Serienanwendung im Bereich großformatiger Gusskomponenten darstellt. Vor diesem Hintergrund werden weitere Entwicklungsschritte angestrebt, die auf eine höhere technologische Reife und eine Erprobung unter industriellen Einsatzbedingungen abzielen. Ziel ist es, die Technologie schrittweise in reale Produktionsumgebungen zu überführen und die Voraussetzungen für eine nachhaltige industrielle Nutzung zu schaffen.

2.5. Durchführung des Vorhaben und Fortschritt des Vorhabens bei anderen Stellen

Zu Durchführung und Ergebnissen von Teilaspekten des Gesamtprojekts bei den weiteren Projektpartnern werden gesonderte Berichte erstellt. Diese Berichte behandeln insbesondere die jeweiligen fachlichen Schwerpunkte der beteiligten Partner sowie deren spezifische Beiträge zur Entwicklung und Erprobung der additiven Fertigungsanlage.

2.6. Darstellung der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts wurden keine eigenständigen Veröffentlichungen zu Projektdetails oder Forschungsergebnissen vorgenommen. Die vorliegende Veröffentlichung dient der allgemeinen Darstellung der wissenschaftlich-technischen Arbeiten und Ergebnisse des Projekts in anonymisierter Form.

Diese Veröffentlichung stellt eine anonymisierte Fassung eines Abschlussberichts dar. Unternehmens-, produkt- und wirtschaftsspezifische Informationen wurden entfernt oder abstrahiert. Der Bericht dient ausschließlich der Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse.