



Abschlussbericht zu dem Forschungsprojekt

## **Rapid Prototyping von Sandformen mit anorganischen Bindersystemen (1. Phase)**

von

Dr.-Ing. Daniel Günther  
(voxeljet technology GmbH) und

und

Dipl.-Ing. Robert Ramakrishnan  
(TUM – Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen)

Friedberg / Garching 08.08.2013



**(DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2)**

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>30340</b>	Referat	<b>21/2</b>	Fördersumme	<b>124.830,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Rapid Prototyping von Sandformen mit anorganischen Bindersystemen (1. Phase)</b>			
<b>Stichworte</b>		Rapid Prototyping, 3D-Druck, Anorganik, Kernherstellung, Sandform, Guss			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>12 Monate</b>	<b>15.05.2012</b>	<b>14.05.2013</b>	<b>1</b>		
<b>Bewilligungsempfänger</b>		Voxeljet technology GmbH Dr. Ingo Ederer Paul-Lenz-Str. 1 86316 Friedberg		Tel +49(0)8217483-100 Fax +49(0)8217483-111	
				Projektleitung Dr. Ingo Ederer	
				Bearbeiter Dr.-Ing. Daniel Günther	
<b>Kooperationspartner</b>		Technische Universität München Fakultät für Maschinenwesen Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk Walther-Meißner-Straße 4 85748 Garching			
		Bearbeiter: Dipl.-Ing. Robert Ramakrishnan			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
<p>In diesem Projekt wird ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht anorganisch gebundene Sandformen in einem 3D-Druckverfahren herzustellen. In Vorarbeiten wurde ein für den 3D-Druck geeignetes anorganisches Bindersystem entwickelt. In diesem Projekt soll durch intensive Parameterstudien ein Prozessfenster geschaffen werden, in dem erstmals gedruckte Sandformen und -kerne hergestellt werden können, die vergleichbare Eigenschaften zu serienmäßig geschossenen anorganische gebundenen Kernen aufweisen. Dies stellt ein entscheidendes Element der Prozesskette „Anorganik in der Gießerei“ dar und leistet einen großen Beitrag zur weiteren Verbreitung dieser umweltschonenden und nachhaltigen Technologie.</p>					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<p>Das erste Arbeitspaket beinhaltet die Umrüstung und den Aufbau einer RP-Anlage vom Typ VX-500 der Firma Voxeljet am Lehrstuhl utg. Die Anlage wird in Betrieb genommen und ein stabiler Referenz-Bauprozess dargestellt. Um grundlegende Eigenschaften der Kerne wie Biegefestigkeit, Gasdurchlässigkeit und Feuchtegehalt quantifizieren zu können, wird im zweiten Arbeitspaket am utg eine entsprechende Prüfmethodik aufgebaut und in Betrieb genommen. Nach Inbetriebnahme der Anlage und erfolgreicher Qualifizierung eines stabilen Referenz-Bauprozesses werden aus den, in AP 2 definierten Prüfmethoden, relevante Prüfkörper abgeleitet. Die Weiterentwicklung des anorganischen Sand-Binder-Systems VX-AOB erfolgt in AP 3 im Hause Voxeljet. Um eine Ursache-Wirkungs-Analyse zwischen den Prozessparametern und den definierten Qualitätsmerkmalen darstellen zu können, wird in AP 4 die Anlage am utg mit umfassender Messtechnik ausgestattet. Ebenso werden Anpassungen an der Anlagentechnik (v.a. Heizkonzept) vorgenommen. Der Einfluss verschiedenerer Prozessparameter auf die untersuchten Qualitätsmerkmale schließt das AP 4 ab. Ziel des AP 5 ist es, die Gießbarkeit einer mittels 3D-Drucken hergestellten, anorganisch gebundenen Sandform zu zeigen. Hierzu wird ein Demonstrator-Gussbauteil definiert und die entsprechende Form hergestellt. Das Arbeitspaket schließt mit dem Abguss des Demonstrator-Gussbauteils in die anorganische RP-Form. Das Arbeitspaket 6 besteht aus der ausführlichen Dokumentation des Projektfortschritts und der gewonnenen Ergebnisse.</p>					

### **Projektstatus / Ergebnisse**

#### **AP 1: Inbetriebnahme RP-Anlage**

Nach Abschluss der Umrüstarbeiten der Fa. Voxeljet an der VX-500 wurde die Anlage am 26.07.2012 an das utg übergeben. Der Aufbau und die Inbetriebnahme erfolgten an den darauffolgenden Tagen unter der Leitung von Hrn. Dr. Günther, Hr. Reihle und Hr. Ramakrishnan (wiss. MA utg) erhielten eine detaillierte Einweisung in die Anlagenbedienung und -technik. In einem Referenz-Bauprozess konnte die Funktionsfähigkeit der Anlage bestätigt werden und erste, einfache Geometrien gedruckt werden. Das Arbeitspaket 1 wurde somit erfolgreich abgeschlossen.

#### **AP 2: Prüfmethode**

Die benötigten Prüfgeräte wurden am 04.10.2012 geliefert. Die Kosten für diese Prüfgeräte lagen innerhalb des beantragten Budgets und können der eingereichten Mittelanforderung entnommen werden. Die Prüfanlagen wurden in Betrieb genommen und durch die Prüfung anhand von geschossenen Serienprüflingen der BMW Leichtmetallgießerei verifiziert. Das Arbeitspaket 2 wurde somit erfolgreich abgeschlossen.

#### **AP 3: Sand- und Bindersysteme**

Im Hause Voxeljet wurden auf Basis des bestehenden anorganischen Sand-Binder-Systems VX-AOB Weiterentwicklungen durchgeführt. Durch die Optimierung von Additiven und Bindergehalten konnten verbesserte Eigenschaften von gedruckten Kernen erzielt werden. Aus den Entwicklungsarbeiten ist das verbesserte Sand-Binder-System VX-AOB 2 hervorgegangen, welches auf die Anlage am utg übertragen wurde. Das Arbeitspaket 3 wurde somit erfolgreich abgeschlossen.

#### **AP 4: Prozessparameter**

Im Rahmen des AP4 wurde die Baufeldinhomogenität identifiziert und als sehr relevant für die Bauteileigenschaften eingestuft. Hierauf folgten die Integration der Prozessüberwachung und die Anpassung des Heizkonzepts. Mit dem angepassten Heizkonzept wurde ein neuer Istzustand der Anlage ausführlich dokumentiert. Den Abschluss des Arbeitspakets 4 bildete die Korrelation der Prozessparameter mit den in Arbeitspaket 2 definierten Prüfgrößen. Das Arbeitspaket 4 wurde somit erfolgreich abgeschlossen.

#### **AP 5: Demonstrator**

Im Arbeitspaket 5 wurde ein Demonstrator-Gussteil in einer am utg hergestellten, anorganisch gedruckten Sandform gegossen. Der Gießprozess und das Gussteil wurden bewertet und ein Vergleich zum konventionellen Kaltherdverfahren aufgestellt. Das Arbeitspaket 5 wurde somit erfolgreich abgeschlossen.

#### **AP 6: Dokumentation**

Die Dokumentation des Projekts erfolgte anhand von Protokollen zu den Projekttreffen, Projektkennblätter sowie des Zwischenberichts, der gemeinsam mit dem Projektantrag für das Nachfolgeprojekt (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2 - 2) an die DBU übergeben wurde. Das Arbeitspaket 6 wurde mit dem Einreichen des vorliegenden Abschlussberichts erfolgreich abgeschlossen.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Projektergebnisse wurden auf einer Vielzahl von Veranstaltungen (Münchner Kolloquium, Barbaratagung, Forming Technology Forum, Leichtbau in Guss) Besuchern des Lehrstuhls vorgestellt. Die Vorstellung von Ergebnissen dieses Projekts, sowie des Nachfolgeprojekts ist auf dem AGIFA Doktorandenseminar im Dezember 2013 geplant. Im Anschluss daran erfolgt eine Veröffentlichung im Fachjournal GIESSEREI.

### **Fazit**

Mit der hervorragenden Zusammenarbeit der Projektpartner konnten sämtliche Arbeitspakete im Rahmen des vorgegebenen Zeit- und Kostenplans bearbeitet werden. Durch regelmäßige Treffen findet ein reger Informationsaustausch statt und das aktuell laufende Nachfolgeprojekt wird zügig vorangetrieben. Mit Hilfe der im Rahmen des Projekts angeschafften Prüfmethode und der Integration zusätzlicher Messtechnik können wertvolle Daten gesammelt werden, die zur Erweiterung des Prozessverständnisses beitragen. Für die im Rahmen der 1. Projektphase untersuchten Prozessparameter und Qualitätsmerkmale konnten schlüssige Ursache-Wirkungs-Analysen durchgeführt werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgt in der bis Mitte 2015 laufenden Phase 2 des Projekts die erweiterte Untersuchung der Prozessparameter und Qualitätsmerkmale sowohl für die gedruckten Sandformen und -kerne als auch für Gussteile.

## Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnis von Abbildungen .....	5
2	Verzeichnis von Diagrammen .....	6
3	Zusammenfassung .....	7
4	Einleitung .....	9
4.1	Rapid Prototyping Verfahren zur Form- und Kernherstellung im Metallguss.....	9
4.2	Anorganische Bindersysteme zur Form- und Kernherstellung im Metallguss .....	10
4.3	Zielsetzung .....	11
5	Hauptteil .....	12
5.1	AP 1: Inbetriebnahme RP-Anlage .....	12
5.2	AP 2: Bereitstellung Prüfmethode n .....	14
5.3	AP 3: Sand und Bindersysteme .....	20
5.4	AP 4: Prozessparameter .....	21
5.5	AP 5: Demonstrator .....	34
5.6	AP 6: Dokumentation .....	34
6	Fazit.....	35
7	Literaturverzeichnis .....	36

## 1 Verzeichnis von Abbildungen

Abbildung 1:	Prozessschritte bei dem 3D-Druckprozess.....	9
Abbildung 2:	Übersicht über die Projektstruktur des laufenden Projekts .....	12
Abbildung 3:	RP-Anlage vom Typ VX-500 nach ihrer erfolgreichen Inbetriebnahme am Lehrstuhl utg.....	13
Abbildung 4:	Fotographie der gedruckten Referenzgeometrien „Biegeriegel“ und „Diffusion“ nach der Entnahme aus der Anlage. Der Rahmen entspricht den Grundabmessungen der Jobbox von 400 x 500 mm. ....	14
Abbildung 5:	Prüfgeräte nach Aufbau und Inbetriebnahme am utg. Präzisionswaage (1), Gasdurchlässigkeitsprüf-gerät (2), Universalfestigkeitsprüfgerät (3) und Feuchtebestimmer (4).....	14
Abbildung 6:	Referenzprüfgerät 1 von BMW. Der Biegeriegel wird in die Aufnahme (1) eingelegt und durch den Stößel (2) belastet, der von dem Motor (4) angetrieben wird. Das Prüfergebnis ist auf der Anzeige (3) abzulesen. ....	15
Abbildung 7:	Referenzprüfgerät 2 von BMW. Der Biegeriegel wird in die Aufnahme (1) eingelegt und durch den Stößel (2) belastet, der von dem Motor (4) angetrieben wird. Das Prüfergebnis ist auf der Anzeige (3) abzulesen. ....	15
Abbildung 8:	Universalfestigkeitsprüfgerät am utg. Der Biegeriegel wird in die Aufnahme (1) eingelegt und durch den Stößel (2) belastet, der von dem innenliegenden Motor (4) angetrieben wird. Das Prüfergebnis ist auf der digitalen Anzeige (3) abzulesen. ....	16
Abbildung 9:	Erweiterung des Arbeitspakets 4 .....	22
Abbildung 10:	Prüfling <i>Diffusion</i> , der in der Mitte des Baufelds (1) und in der Ecke des Baufelds (2) gedruckt wurde. ....	22
Abbildung 11:	Aufbau der Wärmebildkamera mit Blick auf das Baufeld .....	23
Abbildung 12:	Wärmebildaufnahme während des Bauprozesses in der VX-500 Anlage. Anhand der Falschfarbendarstellung ist die inhomogene Temperaturverteilung auf der Baufeldoberfläche deutlich zu erkennen.....	23
Abbildung 13:	Job mit 12 Diffusionsproben der ohne den Einsatz der Heizlampe gedruckt wurde. Die Prüflinge haben unabhängig von ihrer Lage im Baufeld die gleiche Temperatur.....	24
Abbildung 14:	Fotographie eines der Jobs die als Prinzipversuch ohne den Einsatz der Heizlampe gedruckt wurden. Alle Prüflinge zeigen unabhängig von ihrer Lage in der Jobbox ähnlich starke Diffusion.....	24
Abbildung 15:	RP-Anlage vom Typ VX-500 nach dem Umbau zur Integration der Prozessüberwachung .....	25
Abbildung 16:	Wärmebilder des Baufelds nach dem Beheizen (A) und nach dem Bedrucken (B) einer Schicht.....	26
Abbildung 17:	Sicht auf das Baufeld. Die Thermoelemente sind an dessen linken (L) und rechten (r) Rand jeweils vorne (V), mittig (M) und hinten (H) positioniert.....	27
Abbildung 18:	Wärmebilder des Baufelds aufgenommen nach der Anpassung des Heizkonzepts. Temperaturverteilung nach dem Beheizen (A) und nach dem Bedrucken (B) einer Schicht. ....	28
Abbildung 19:	Anordnung der 3-Punkt-Biegung-Prüflinge in der Jobbox in y-Richtung (links) und in x-Richtung (rechts) .....	30
Abbildung 20:	Exemplarischer Vergleich einer Diffusionsprobe aus einem Prozess ohne Heizlampe (a) mit einer aus einem Prozess mit Heizlampe (b) .....	33
Abbildung 21:	Vergleich des Demonstrator-Gussbauteils in 3D gedruckten Formen aus dem Serien-Kaltharzsystem (links) und dem anorganischen System VX-AOB (rechts).....	34

## 2 Verzeichnis von Diagrammen

Diagramm 1:	Auftragung der Bruchfestigkeit über den Zeitpunkt der Biegeriegelherstellung für Messwerte der beiden BMW Prüfgeräte und des utg Prüfgeräts. ....	17
Diagramm 2:	Zweite Messreihe der Bruchfestigkeit über den Zeitpunkt der Biegeriegelherstellung für Messwerte der beiden BMW Prüfgeräte und des utg Prüfgeräts .....	18
Diagramm 3:	Vergleichsmessungen des Feuchtegehalts von Serienkernen der BMW Leichtmetallgießerei..	19
Diagramm 4:	Vergleich der Gasdurchlässigkeitszahlen zweier bei BMW eingesetzten anorganischen Kernsanden .....	20
Diagramm 5:	Aufzeichnungen der Temperatur am linken (A) und rechten (B) Baufeldrand, die durch die Integration der Thermoelemente ermöglicht wurde. ....	27
Diagramm 6:	Aufzeichnungen der Temperatur am linken (A) und rechten (B) Baufeldrand, die durch die Integration der Thermoelemente ermöglicht wurde. ....	29
Diagramm 7:	Vergleich der 3-Punkt-Biegefestigkeiten in y-Richtung ohne (links) und mit (rechts) Einsatz der Heizlampe.....	31
Diagramm 8:	Gewichte der Diffusionsproben, die ohne den Einsatz der Heizlampe gedruckt wurden .....	32
Diagramm 9:	Gewichte der Diffusionsproben, die mit Einsatz der Heizlampe gedruckt wurden .....	32
Diagramm 10:	Grafische Darstellung der Gasdurchlässigkeitsmessung nach VDG Merkblatt 41.....	33

### 3 Zusammenfassung

Die Entwicklung von umweltfreundlichen und nachhaltigen Produktionsprozessen hat in der deutschen Industrie einen sehr hohen Stellenwert eingenommen. Das produzierende Gewerbe hierzulande zeichnet sich in vielen Bereichen durch seine Vorreiterrolle bei Mitarbeiter- und Umweltschutz aus. Traditionell zählt die Gießereibranche eher zu den „schmutzigen“ Industriezweigen. Schädliche Emissionen, die bei der Herstellung von metallischen Gussbauteilen freigesetzt werden, stellen eine beträchtliche Belastung für Mensch und Umwelt dar. Einer der Hauptverursacher dieser Emissionen sind organisch gebundene Sandformen und -kerne. Formen werden dabei für die Außenkonturen, Kerne für die Innenkonturen von komplexen Gussprodukten benötigt. Bei Kontakt mit einer metallischen Schmelze, die je nach Material ca. 1000°C heiß ist, verbrennen die organischen Substanzen und setzen umwelt- und gesundheitsschädliche Verbrennungsgase frei. Mit zunehmendem Umweltbewusstsein des produzierenden Gewerbes in Deutschland hat sich in den letzten 10 Jahren ein starker Trend entwickelt die Fertigung von Sandformen und -kernen von konventionellen organisch gebundenen Sanden auf neuartige, anorganische Bindersysteme umzustellen. Diese anorganischen Bindersysteme enthalten keine Kohlenwasserstoffe und verursachen somit bei dem Kontakt mit der metallischen Schmelze keine schädlichen Emissionen. Sowohl mittelständische als auch großindustrielle Gießereien haben in Deutschland mit der Umstellung auf anorganische Bindersysteme begonnen. Diese Umstellung erfordert jedoch tiefgreifende Veränderungen im gesamten Produktionsprozess, so dass Vorbehalte und Unsicherheiten der Verbreitung dieser technologisch und ökologisch sinnvollen Entwicklung im Wege stehen.

Die Förderung dieses Projekts (Phase 1) durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt setzte 2012 den Grundstein für die erfolgreiche Zusammenarbeit der voxeljet technology GmbH mit dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) auf dem Gebiet des 3D-Druckens mit anorganischen Sand-Binder-Systemen. In diesem Projekt wird ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht, anorganisch gebundene Sandformen in einem 3D-Druckverfahren herzustellen. Das 3D-Drucken ist ein bewährter und weit verbreiteter Prozess zur Herstellung von Sandformen und -kernen, wie sie für Prototypen und Kleinserien benötigt werden. Dieses Rapid Prototyping Verfahren (RP-Verfahren) ist besonders attraktiv, da durch die generative Fertigungsmethode auf kostenintensive Werkzeuge verzichtet werden kann. Derzeit basiert das 3D-Drucken im industriellen Gießereibereich ausschließlich auf organischen Bindersystemen. Dies bedeutet jedoch, dass eine Übertragung der Eigenschaften einer organisch gedruckten Prototypenform auf die später anorganisch gebundenen Serienformen nur sehr eingeschränkt möglich ist. Dieser Umstand führt zu großer Verunsicherung bei einer Umstellung von Produktionsprozessen und behindert somit die weitere Verbreitung der umweltfreundlichen, anorganischen Bindersysteme.

In Vorarbeiten wurde von der Firma Voxeljet und dem Industriepartner Hüttenes-Albertus Chemische Werke GmbH ein anorganisches Bindersystem entwickelt, welches sich grundsätzlich für den Einsatz in einem 3D-Druckverfahren eignet. Im Rahmen des Projekts wurde ein 3D-Drucker an dem Lehrstuhl *utg* in Betrieb genommen und eine intensive Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Bauteileigenschaften durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sowie aus den Forschungsarbeiten hervorgegangene Anpassungen der Anlagen- und Prozesstechnik werden in diesem Abschlussbericht dargelegt.

Auf Basis der erfolgreichen und zielführenden Zusammenarbeit des ersten, einjährigen Projekts wurde im April 2013 der Antrag auf die zweite Projektphase (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2 - 2) bei der DBU eingereicht. Dieser wurde im Juni 2013 genehmigt, so dass die Forschungsarbeiten ohne Unterbrechung fortgeführt werden konnten. Kern der Forschungsarbeiten für die Phase 2 des Projekts stellt die Prozessentwicklung auf Basis erweiterter Anlagentechnik und Prüfmethodik dar. Ebenso wird das Sand-Binder-System – mit besonderem Augenmerk auf der Wiederverwendbarkeit – untersucht. Die enge Zusammenarbeit mit den Partnergießereien, in Zuge dessen eine Vielzahl von realen Gussteilen hergestellt und untersucht wird, stellt die industrielle Relevanz sicher. Mit diesem Forschungsvorhaben leisten wir einen substantiellen Beitrag zu der weiteren Verbreitung und Akzeptanz der umweltschonenden und nachhaltigen Technologie „Anorganik“ in deutschen Gießereien.

## 4 Einleitung

Dieser Abschnitt vermittelt dem Leser Grundlagen zu dem Rapid Prototyping Prozess und dem eingesetzten anorganischen Bindersystem, die notwendig sind um die dargestellten Ergebnisse nachvollziehen zu können. Ebenso gibt dieser Abschnitt einen Überblick des aktuellen Stands der Technik des 3D-Druckens und der anorganischen Bindersysteme zur Form- und Kernherstellung im Metallguss. Abschließend wird die Zielsetzung des Projekts erläutert.

### 4.1 Rapid Prototyping Verfahren zur Form- und Kernherstellung im Metallguss

Das 3D-Drucken von Formen und Kernen ist im organischen Kaltharzsystem seit einigen Jahren Stand der Technik [EDER04]. Hierbei wird als organischer Binder Furfurylalkohol mit einer Säure in Kontakt gebracht. Diese beiden Komponenten verkleben den Formgrundstoff in dem sie polymerisieren.

Ausgehend von einem CAD-Modell werden Daten für einen Tintenstrahldruckkopf generiert. Über einen Pulverbeschichter (*Recoater*) wird zur Erstellung der gewünschten Bauteile zuerst eine Schicht aus Formstoff erzeugt. Im Anschluss bringt ein Tintenstrahldruckkopf die Daten in Form von Mikrotropfen auf die gebildete Schicht auf. In den Bereichen die, gemäß eines Schnittes durch das Modell verfestigt werden sollen, reagiert nun der Binder mit dem Formstoff. Dieser wird dazu vorher mit der Säure aufbereitet. Im Anschluss an den Schritt des Druckens wird die sogenannte Bauplattform (*Jobbox*) um den Betrag der zuvor aufgebrauchte Schichtdicke abgesenkt. Abbildung 1 gibt eine Übersicht der Prozessschritte beim 3D-Drucken.

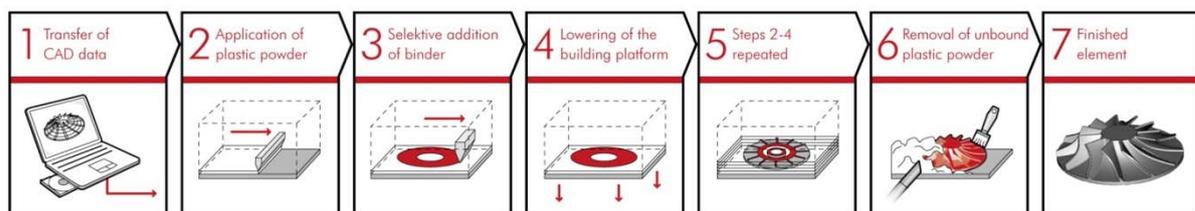


Abbildung 1: Prozessschritte bei dem 3D-Druckprozess.

Quelle: Voxeljet

Die Schritte 2 – 4 werden solange wiederholt bis das gewünschte Teil fertig gestellt ist. Nach Beendigung des Druckprozesses kann der unbedruckte Formstoff entfernt und die fertige Gussform bzw. der fertige Kern entnommen werden.

Ebenso können 3D-Drucksysteme genutzt werden, um anorganisch gebundene Formen und Kerne zu drucken. Der dabei verwendete Binder basiert auf einem Zweikomponentensystem. Eine Komponente, die im zuvor mit dem Formgrundstoff (Quarzsand) gemischt wird, ist ein Trockenbinder auf Wasserglasbasis. Als zweite Komponente kann eine wasserbasierte Lösung verwendet werden, die mit einem Tintenstrahldruckkopf verdruckt wird. Der grundlegende Prozessablauf gleicht dabei dem in Abbildung 1 beschriebenen. Als ein Ergebnis vorhergehender Untersuchungen zeigte sich, dass zusätzlich eine Maßnahme zur Erwärmung des Baufelds – auf welches der Flüssigbinder aufgebracht wird – notwendig ist. Diese Notwendigkeit beruht auf folgenden Feststellungen:

- Wärme steigert die Reaktivität des trockenen Wasserglases wenn es in Kontakt mit der flüssigen Binderkomponente kommt. So können schneller Binderbrücken zwischen den einzelnen Sandkörnern entstehen, die letztlich für die Festigkeit entscheidend sind.
- Wärme führt zu einem schnelleren Verdampfen von überflüssiger Feuchtigkeit aus dem Sandbett. Hierdurch wird der unerwünschten Ausbreitung von Flüssigkeit in das umliegende, trockene Sand-Binder-Gemisch entgegengewirkt.

Aus diesem Gründen wird bei diesem Verfahren der Beschichtungsvorgang mit einem Heizprozess kombiniert. Die Heizung erfolgt über eine Infrarot-Heizlampe, die an der Recoaterachse der Anlage montiert ist. Sie erwärmt nach jedem Prozessschritt das Baufeld und ermöglicht somit erst eine zielführende Verarbeitung des umweltfreundlichen anorganischen Bindersystems. Der folgende Abschnitt gibt eine kurze Übersicht über die aktuelle Verwendung anorganischer Bindersysteme zur Form- und Kernherstellung in der deutschen Gießereibranche.

#### 4.2 Anorganische Bindersysteme zur Form- und Kernherstellung im Metallguss

Historisch gesehen sind anorganische Bindersysteme so alt wie die Gießereitechnik selbst. Dementsprechend umfasst der Begriff „anorganische Bindersysteme“ ein sehr breites Spektrum an chemisch härtenden Formstoffen die heutzutage in der Gießereiindustrie verwendet werden. Trotz ihrer Vielschichtigkeit lassen sich die anorganischen Systeme klar von den organischen Bindemitteln abgrenzen. Zentrales Merkmal der anorganischen Systeme ist, dass sie technisch frei von Kohlenwasserstoffverbindungen sind. Die Abwesenheit dieser organischen Verbindungen und die damit verbundene positive Umweltbilanz bei Formstoffherstellung, Verarbeitung und dem Abguss ist der Hauptgrund für die Renaissance der anorganischen Formstoffe [GROE12]. Das anorganische Bindersystem basiert hierbei auf einem modifizierten Wasserglas, welches durch verschiedene mineralische Zusätze so eingestellt werden kann, dass bei stark verringerten Emissionen gleichzeitig bessere gießtechnische Eigenschaften erreicht werden können. Durch das Umdenken der Gießereien ist seit der Jahrtausendwende ein stetiger Anstieg der Verwendung anorganischer Bindersysteme zu verzeichnen. So wurden eine Vielzahl von Neuentwicklungen auf diesem Gebiet auf der weltgrößten Gießereifachmesse GIFA in den Jahren 2003 und 2007 vorgestellt [TILC03, POLZ07]. Dieser Trend setzt sich stetig fort und so konnte im Jahr 2010 die BMW Leichtmetallgießerei – Industriepartner des beantragten Projekts – die Umstellung der gesamten Serienproduktion auf „Anorganik“ melden [ESSB10]. Mit der konsequenten Umsetzung dieses Verfahrens ließ sich der CO<sub>2</sub>-Footprint der Gießerei drastisch senken [WEIS11]. Nach den Erfolgen im Leichtmetallguss sind auch Bestrebungen der Umstellung im Eisen- und Stahlguss zu verzeichnen. So hat die Gießerei des Daimler Konzerns in Esslingen/Mettingen im Jahr 2011 ebenfalls den Umstieg auf umweltfreundliche anorganische Binder sowohl im Leichtmetall- als auch im Stahlguss beschlossen [BOEH12]. Durch die Umstellung der Seriengießprozesse auf anorganische Formen und Kerne ergeben sich im Vergleich zu organischen Systemen folgende Vorteile [PABE09]:

- Umwelt und Gesundheit:
  - keine Emissionen bei der Kernfertigung
  - drastische Reduktion der Emissionen beim Abguss
- Technologie:
  - keine organische Kondensatanhaftung am Gussteil
  - verbesserte Werkstoffeigenschaften

- Wirtschaftlichkeit:
  - geringere Verschmutzung und Instandhaltung der Gießwerkzeuge
  - reduzierte Luftaufbereitung

Trotz dieser ökologischen, technologischen und ökonomischen Vorteile stellen organische Bindersysteme – im Speziellen das Polyurethan(PUR)-Cold-Box-Verfahren – bis heute den größten Anteil der verwendeten Formstoffsysteme dar [WOLF09]. Dabei sind über 90 % der Emissionen einer Gießerei auf diese organischen Systeme zurückzuführen [GREF11]. Aufgrund der langjährigen Erfahrungen mit organischen Systemen sowie den Unsicherheiten und Risiken einer Prozessumstellung haben viele Gießereien Vorbehalte gegenüber der Technologie anorganischer Bindersysteme.

An dieser Stelle greift das beantragte Forschungsprojekt ein. Nach aktuellem Stand der Technik gibt es noch kein Verfahren mit dem anorganisch gebundene Formen und Kerne in einem RP-Verfahren hergestellt werden können. Mit der Entwicklung eines 3D-Druckverfahrens zur Herstellung anorganisch gebundener Sandformen und -kerne lässt sich die Akzeptanz und Verbreitung dieser umweltfreundlichen Technologie entscheidend fördern: Da die Fertigung der Formen und Kerne werkzeuglos geschieht, kann ein Gussteil mit geringen Investitionen bereits in der Prototypenphase anorganisch hergestellt werden. Durch den frühen Einsatz der „Anorganik“ im Produktentstehungsprozess lässt sich die Barriere zwischen der bislang „organischen“ Prototypenphase und der aktuell und zukünftigen „anorganischen“ Serienphase überbrücken. Diese Forschungs- und Entwicklungsarbeit hilft Gießereien aller Größenordnungen frühzeitig Erfahrungen mit anorganischen Systemen zu sammeln und die Risiken und Vorbehalte einer Umstellung auf anorganische Bindersysteme zu minimieren.

### 4.3 Zielsetzung

Zielsetzung dieses 12-monatigen Projektes war es, eine grundlegende Vergleichbarkeit zwischen serienmäßig geschossenen, anorganisch gebundenen Kernen und anorganisch gedruckten RP-Kernen darzustellen. Durch intensive Untersuchungen soll ein tiefgreifendes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Sand-Binder-System, Prozessparametern und Kerneigenschaften geschaffen werden. Aufbauend auf diesen Untersuchungen sowie einer eigenen Prüfmethode werden für das 3D-Drucken mit einem bestehenden anorganischen Bindesystem sinnvolle Prozessfenster erarbeitet.

Dieses 12-monatige Projekt und das Erreichen dieser Ziele stellen die Basis für intensivere Untersuchungen an gedruckten Sandkernen sowie an Gussteilen, die mit gedruckten Kernen gegossen wurden, dar. Diese Ziele werden aktuell in der 2. Phase des Projekts (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2-2) verfolgt. Hier sehen wir sehr großes Potential einen Anreiz zur breiten Umstellung auf diese umweltschonendere Technologie zu schaffen. Durch das Einbringen anorganischer Bindersysteme bereits in der Prototypenphase eines Produktentstehungsprozesses wird die Prozesskette „Anorganik“ geschlossen und ein Gewinn an Prozessrobustheit und -sicherheit geschaffen. Mit der gemeinsamen Entwicklungsarbeit fördern wir entschieden den Einsatz von anorganischen Bindersystemen in der Großserie und leisten somit einen maßgeblichen Beitrag zur Reduzierung der Umweltbelastungen durch Gießereibetriebe in Deutschland.

## 5 Hauptteil

Der Forschungsantrag für das vorliegende Projekt (Phase 1) wurde von der DBU am 15.05.2012 positiv bewertet. Die Laufzeit betrug 12 Monate ab dem 15.05.2012. Das Projekt gliederte sich in die folgenden Arbeitspakete:

- AP 1: Inbetriebnahme RP-Anlage
- AP 2: Bereitstellung Prüfmethode
- AP 3: Sand und Bindersysteme
- AP 4: Prozessparameter
- AP 5: Demonstrator
- AP 6: Dokumentation

Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der Arbeitspakete des Projekts.

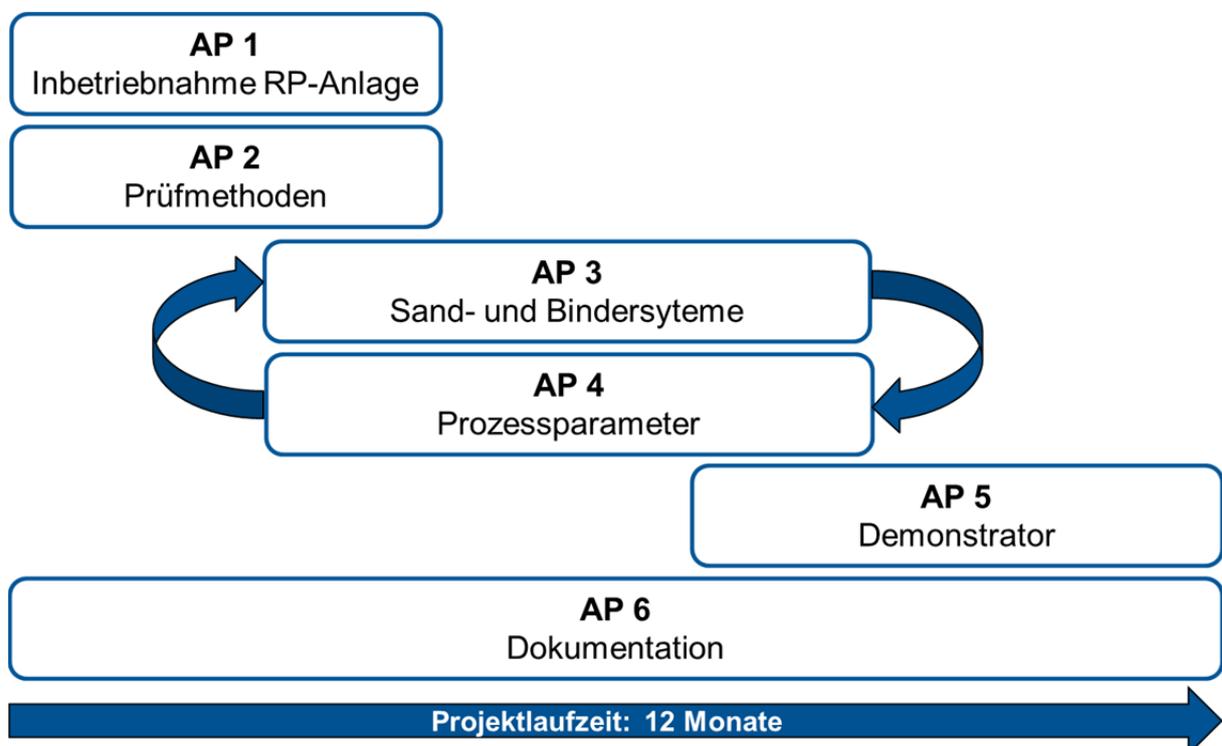


Abbildung 2: Übersicht über die Projektstruktur des laufenden Projekts

In folgendem Abschnitt werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete ausführlich beschrieben und diskutiert.

### 5.1 AP 1: Inbetriebnahme RP-Anlage

Die notwendigen Umrüstmaßnahmen, die den Betrieb der RP-Anlage vom Typ VX-500 mit einem neu entwickelten, anorganischen Bindersystem ermöglichen, wurden wie beantragt von der Firma Voxeljet durchgeführt. Da das Maschinenkonzept ursprünglich für die Kunststoffverarbeitung entwickelt wurde, mussten umfangreiche Anpassungen vorgenommen werden. Im Einzelnen wurden 3 Anlagenbaugruppen umkonstruiert und neu aufgebaut:

1. Um das abrasive Sand- und Wasserglasgemisch sicher verarbeiten zu können, wurden die Baubehälter mit einer Edelstahlwandung ausgeführt. Dies vermeidet zum einen das Klemmen von Sandkörnern zwischen der Dichtung und der Wandung, da der Sand auf dem härteren Edelstahl besser gleitet. Zum zweiten wird dadurch im Falle von Feuchtigkeitzutritt die Korrosion durch die basischen Medien verhindert. Die Serienkonstruktion aus Aluminium kann solchen Medien nicht lange widerstehen.
2. Die Anlage wurde mit einer IR-Lampe mit Handsteuerung ausgerüstet. In der Konstruktion befindet sich die Lampe zwischen dem Beschichter und der Druckachse. Sie ist in ihrer Höhe über dem Baufeld verstellbar um die Intensität einstellen zu können. Für diese Funktion kann ebenso der elektronische Leistungsteller (Handpotentiometer) verwendet werden. Besonderes Augenmerk wurde auf die Ausführung der Hitzeschutzbleche gerichtet, da empfindliche Komponenten (Motor des Beschichters, Druckachse) sich in unmittelbarer Nähe zur Lampe befinden.
3. Das flüssige Druckmedium des Anorganiksystems enthält – ebenso wie der Sand – basische Komponenten. Die im Seriensystem verbauten Aluminiumteile wurden zum Teil umkonstruiert und durch Kunststoffe ersetzt. Zudem wurde eine Vorrichtung zur Entgasung des Druckfluides verbaut, um eine höhere Druckstabilität zu gewährleisten.

Die Anlage wurde am 26.07.2012 an das utg übergeben und in den darauffolgenden Tagen erfolgreich am Lehrstuhl in Betrieb genommen. Abbildung 3 zeigt die RP-Anlage nach dem Aufbau und der erfolgreichen Inbetriebnahme am Lehrstuhl utg.



**Abbildung 3: RP-Anlage vom Typ VX-500 nach ihrer erfolgreichen Inbetriebnahme am Lehrstuhl utg**

Die grundlegende Funktionsfähigkeit der Anlage wurde durch den Druck von verschiedenen Referenzgeometrien bestätigt. Abbildung 4 zeigt eine Fotografie von Teilen, die mit der VX-500 Anlage am utg gedruckt wurden. Hierbei handelt es sich um 12 Probekörper vom Typ *Biegeriegel* und 5 Probekörper vom Typ *Diffusion*, welche jeweils 22,4 mm hoch sind. Diese Abmessungen orientieren sich an dem *VDG-Merkblatt P 72*. Der umliegende Rahmen entspricht den Grundabmessungen des Bauraums der Anlage. Dieser Bauraum – die *Jobbox* – hat Abmessungen von 500 x 400 x 300 mm. In

dem Abschnitt 5.4 wird detailliert auf die Art und Funktion der bislang hergestellten und geprüften Referenzgeometrien eingegangen. Somit konnte das Arbeitspaket 1 im Laufe des August 2012 erfolgreich innerhalb des Zeitplans abgeschlossen werden.

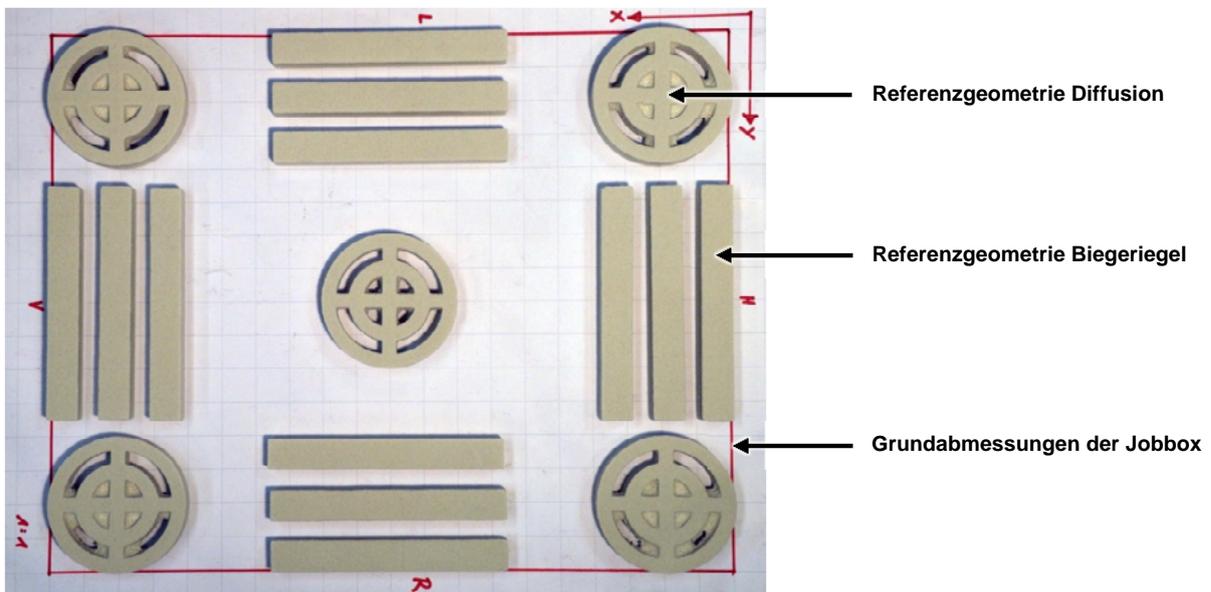


Abbildung 4: Fotografie der gedruckten Referenzgeometrien „Biegeriegel“ und „Diffusion“ nach der Entnahme aus der Anlage. Der Rahmen entspricht den Grundabmessungen der Jobbox von 400 x 500 mm.

## 5.2 AP 2: Bereitstellung Prüfmethoden

Auf Basis detaillierter Recherchen sowie Gesprächen mit Fachleuten für den Bereich „Prüfmethodik von Sandkernen“ der industriellen Partner BMW Group, Leichtmetallgießerei sowie Hüttenes-Albertus konnten notwendige Prüfgeräte klar definiert werden. Abbildung 5 zeigt die Prüfgeräte nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme am utg.

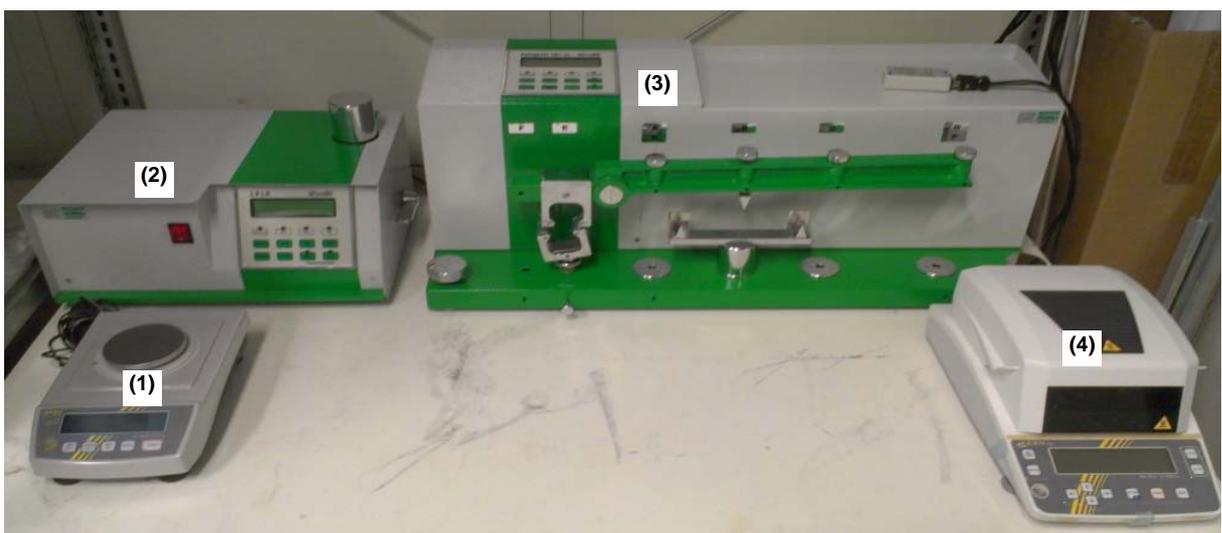


Abbildung 5: Prüfgeräte nach Aufbau und Inbetriebnahme am utg. Präzisionswaage (1), Gasdurchlässigkeitsprüfgerät (2), Universalfestigkeitsprüfgerät (3) und Feuchtebestimmer (4).

Diese Prüfgeräte bilden die notwendige Basis um gemäß dem derzeitigen Stand der Technik aussagekräftige Messungen der Sandprüflinge durchführen zu können. Um sicherzustellen, dass die aufgebaute Prüfmethodik dem Stand der Technik entspricht, wurden die Prüfgeräte nach Inbetriebnahme anhand von geschossenen Serienprüflingen der BMW Leichtmetallgießerei in Landshut verifiziert.

Eine entscheidende Kenngröße bei der Beurteilung einer Sandform oder eines Kerns stellt die Festigkeit dar. Diese wird im Falle von Formstoffen durch einen 3-Punkt-Biegeversuch ermittelt und in der Einheit [N/cm<sup>2</sup>] angegeben. Um die Vergleichbarkeit der Messungen, die am utg mit dem neu angeschafften Universalfestigkeitsprüfgerät durchgeführt werden, mit denen der BMW Leichtmetallgießerei in Landshut sicherzustellen, wurden beide BMW Prüfgeräte an den Lehrstuhl utg gebracht. Die BMW Geräte sind in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt.

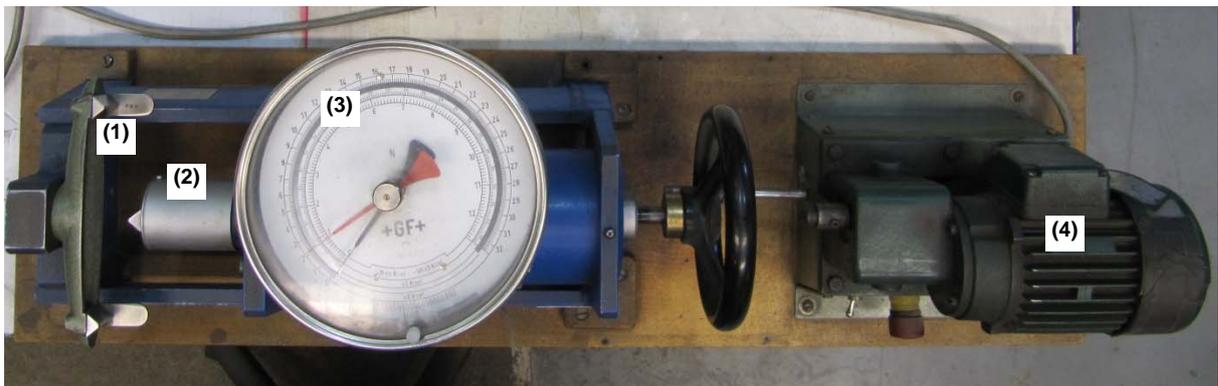


Abbildung 6: Referenzprüfgerät 1 von BMW. Der Biegeriegel wird in die Aufnahme (1) eingelegt und durch den Stößel (2) belastet, der von dem Motor (4) angetrieben wird. Das Prüfergebnis ist auf der Anzeige (3) abzulesen.

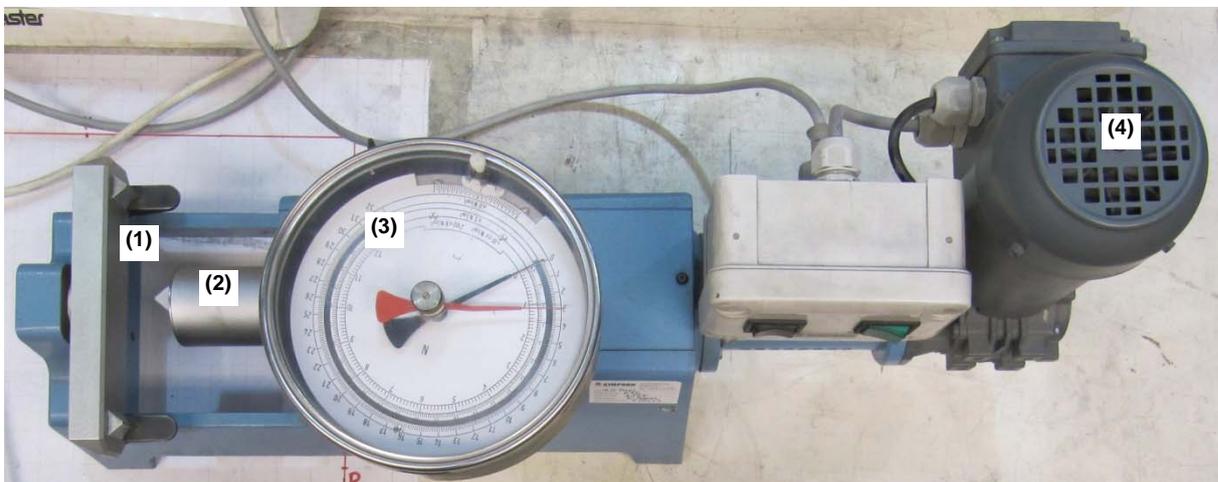
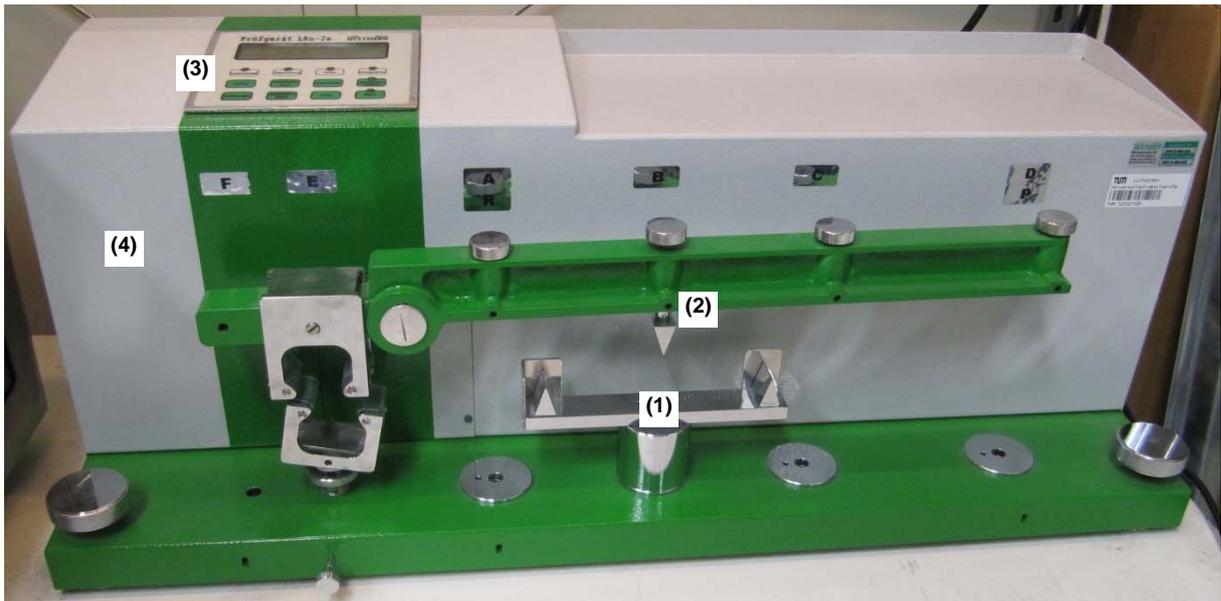


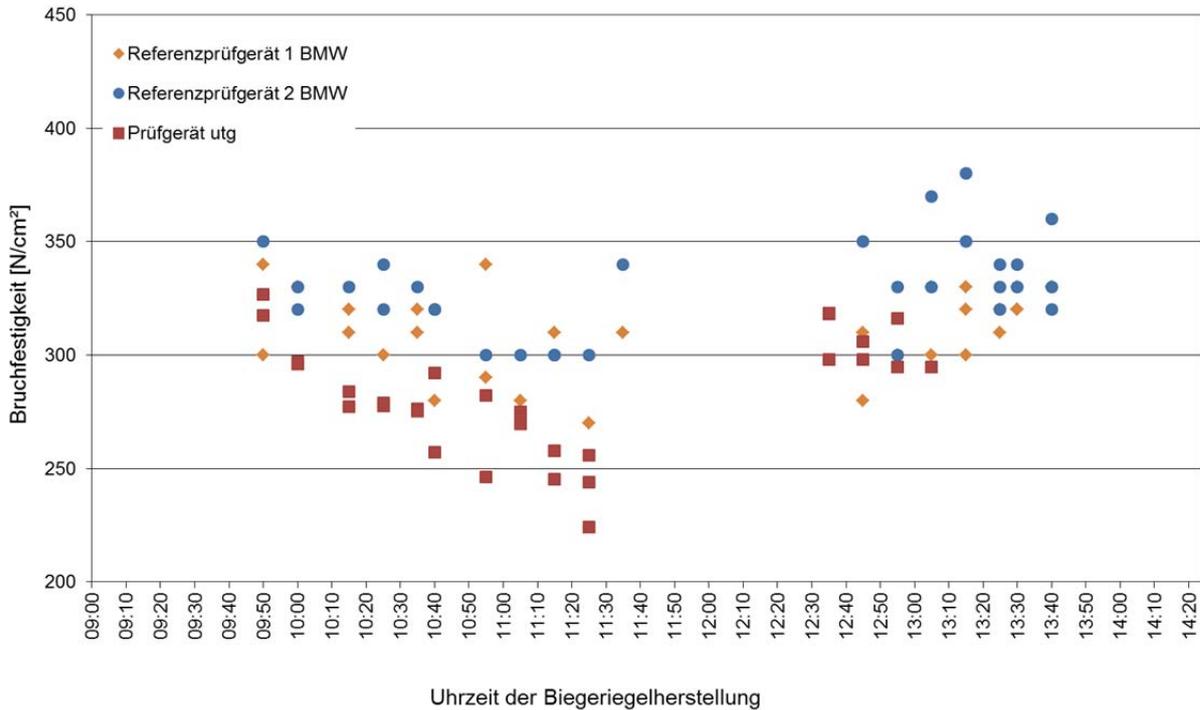
Abbildung 7: Referenzprüfgerät 2 von BMW. Der Biegeriegel wird in die Aufnahme (1) eingelegt und durch den Stößel (2) belastet, der von dem Motor (4) angetrieben wird. Das Prüfergebnis ist auf der Anzeige (3) abzulesen.

Bei beiden Geräten erfolgt der Vortrieb des Stößels über einen hydraulischen, motorbetriebenen Druckzylinder. Das Messergebnis lässt sich auf der analogen Anzeige auf +/- 5 N/cm<sup>2</sup> ablesen. Das im Rahmen des Projekts angeschaffte Universalfestigkeitsprüfgerät ist in Abbildung 8 dargestellt.



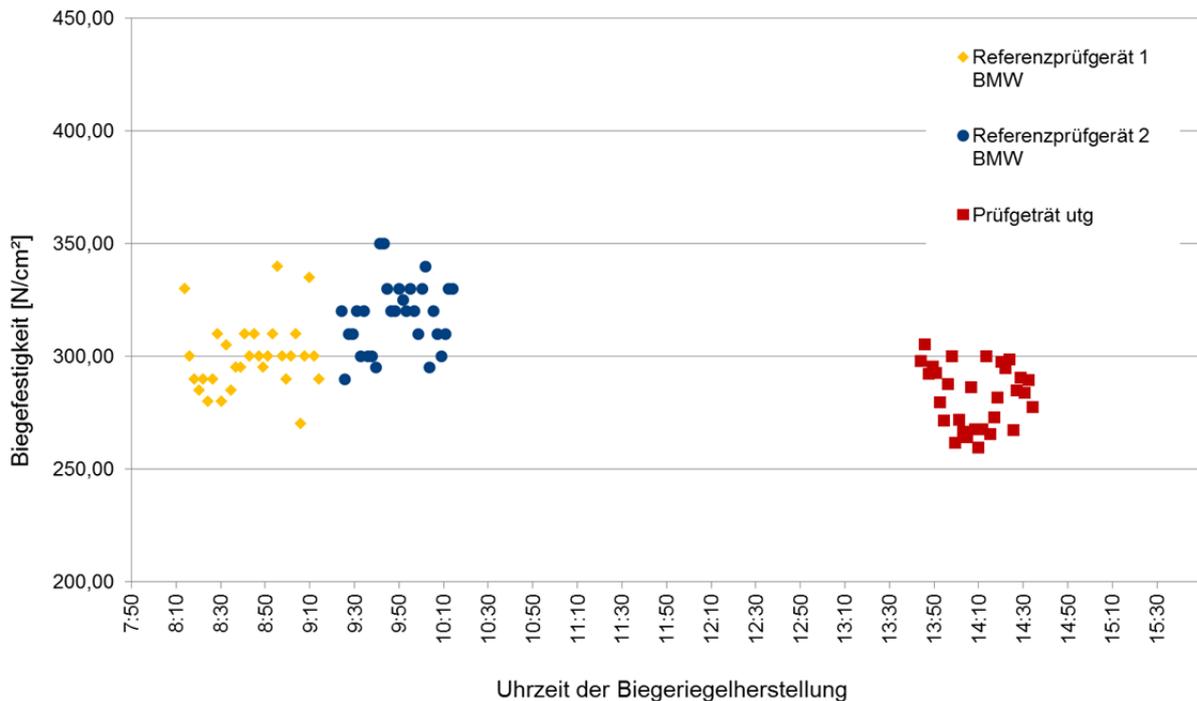
**Abbildung 8:** Universalfestigkeitsprüfgerät am utg. Der Biegeriegel wird in die Aufnahme (1) eingelegt und durch den Stößel (2) belastet, der von dem innenliegenden Motor (4) angetrieben wird. Das Prüfergebnis ist auf der digitalen Anzeige (3) abzulesen.

Hier erfolgt die Lastaufbringung rein mechanisch, wodurch eine exaktere Kupplung mit einer integrierten elektronischen Kraftmessdose möglich ist. Das Messergebnis kann auf der digitalen Anzeige auf  $0,1 \text{ N/cm}^2$  abgelesen, gespeichert und auf einen angeschlossenen Rechner übertragen werden. Diagramm 1 veranschaulicht die Ergebnisse der Prüfung von je 30 geschlossenen Serienprüflingen (Biegeriegel) der BMW Leichtmetallgießerei. Hierbei ist die gemessene Bruchfestigkeit über dem Zeitpunkt der Biegeriegelherstellung aufgetragen. Sämtliche Prüflinge wurden am Vortag in Landshut hergestellt und am Tag der Prüfung zusammen mit den Prüfgeräten an den Lehrstuhl utg transportiert. Hierdurch ließen sich die Vergleichbarkeit der Lagerdauer und -bedingungen aller Prüflinge sicherstellen.



**Diagramm 1: Auftragung der Bruchfestigkeit über den Zeitpunkt der Biegeriegelherstellung für Messwerte der beiden BMW Prüfgeräte und des utg Prüfgeräts.**

Die Ergebnisse der 90 durchgeführten Messungen zeigen, dass eine Abhängigkeit der gemessenen Festigkeiten von dem Herstellungszeitpunkt des Prüflings besteht. Dies ist laut BMW auf die Temperatur des Kernkastens zurückzuführen, welche bei der Herstellung von vielen Prüflingen in Folge, ansteigt. Dieser Anstieg der Kernkastentemperatur spiegelt sich wiederum in einem Absinken des Festigkeitsniveaus wider. Dieser Effekt ist am deutlichsten bei den Messungen des utg-Prüfgeräts zu erkennen, da es die Messwerte mit der größten Genauigkeit erfasst. Im Mittel liegen die Messwerte der Referenzprüfgeräte der BMW Leichtmetallgießerei in Landshut mit 311 N/cm<sup>2</sup> bzw. 329 N/cm<sup>2</sup> hier signifikant über denen des utg-Prüfgeräts mit 282 N/cm<sup>2</sup>. Die Ursache für diese Diskrepanz lag in der Kalibrierung der BMW Prüfgeräte. Diese lag zum Zeitpunkt dieser Messungen bei beiden Geräten ca. 1 Jahr zurück. Nach der erneuten Kalibrierung der Referenzprüfgeräte wurde eine weitere Messreihe durchgeführt. Für diese Messreihe wurden insgesamt 90 Prüflinge (Biegeriegel) bei der BMW Leichtmetallgießerei in Landshut hergestellt und unter vergleichbaren Bedingungen in dem Sandlabor bei BMW und am Lehrstuhl utg geprüft. Dabei erfolgte die Prüfung jeweils 24 Stunden nach der Herstellung des Prüflings. Das Ergebnis dieser zweiten Messreihe zeigt Diagramm 2.



**Diagramm 2: Zweite Messreihe der Bruchfestigkeit über den Zeitpunkt der Biegeiegelherstellung für Messwerte der beiden BMW Prüfgeräte und des utg Prüfgeräts**

Bei dieser zweiten Messreihe wurden die Herstellbedingungen möglichst konstant gehalten um eine Streuung der Messwerte aufgrund der Herstellbedingungen möglichst gering zu halten. Die Auftragung der Messwerte zeigt, dass im Vergleich zu der ersten Messreihe eine zeitliche Abhängigkeit der Festigkeiten ausgeschlossen werden konnte. Die Mittelwerte der gemessenen Festigkeiten mit den beiden BMW Referenzprüfgeräten betragen 300 N/cm<sup>2</sup> (Gerät 1) bzw. 318 N/cm<sup>2</sup> (Gerät 2). Mit dem im Rahmen des Projekts angeschafften Gerät konnte eine Mittlere Festigkeit von 282 N/cm<sup>2</sup> gemessen werden. Demzufolge lagen die Messwerte nach der erneuten Kalibrierung der Referenzgeräte näher an denen des utg-Prüfgeräts. Ein weiterer Abgleich der Messergebnisse wurde mit 30 weiteren, gleichartige Prüflingen durchgeführt, die auf einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick GmbH & Co. KG gebrochen wurden. Diese Messergebnisse zeigten mit einem Mittelwert von sehr gute Übereinstimmung mit dem neu angeschafften Formstoffprüfgerät. Unabhängig von der Abweichung der BMW-Messgeräte zeigt die Versuchsreihe, dass vergleichende Messungen auf dem Prüfgerät des utg sehr einfach und reproduzierbar durchgeführt werden können. Somit konnte ein Sollwert für die 3-Punkt-Biegefestigkeit nach 24 Stunden von 282 N/cm<sup>2</sup> für den Prüfling *Biegeiegel* definiert werden.

Neben der Prüfung der Biegefestigkeit stellt der Feuchtegehalt einer Sandform oder eines Sandkerns ein kritisches Qualitätsmerkmal dar. Der Feuchtegehalt lässt sich mit einem Feuchtebestimmer messen. Die Trocknung einer Probe erfolgt über eine definierte Zeit und bei einer definierten Temperatur. In Diagramm 3 werden Feuchtegehalte eines BMW-Serienkerns gegenübergestellt, die mit dem BMW- und dem utg-Feuchtebestimmer aufgenommenen wurden.

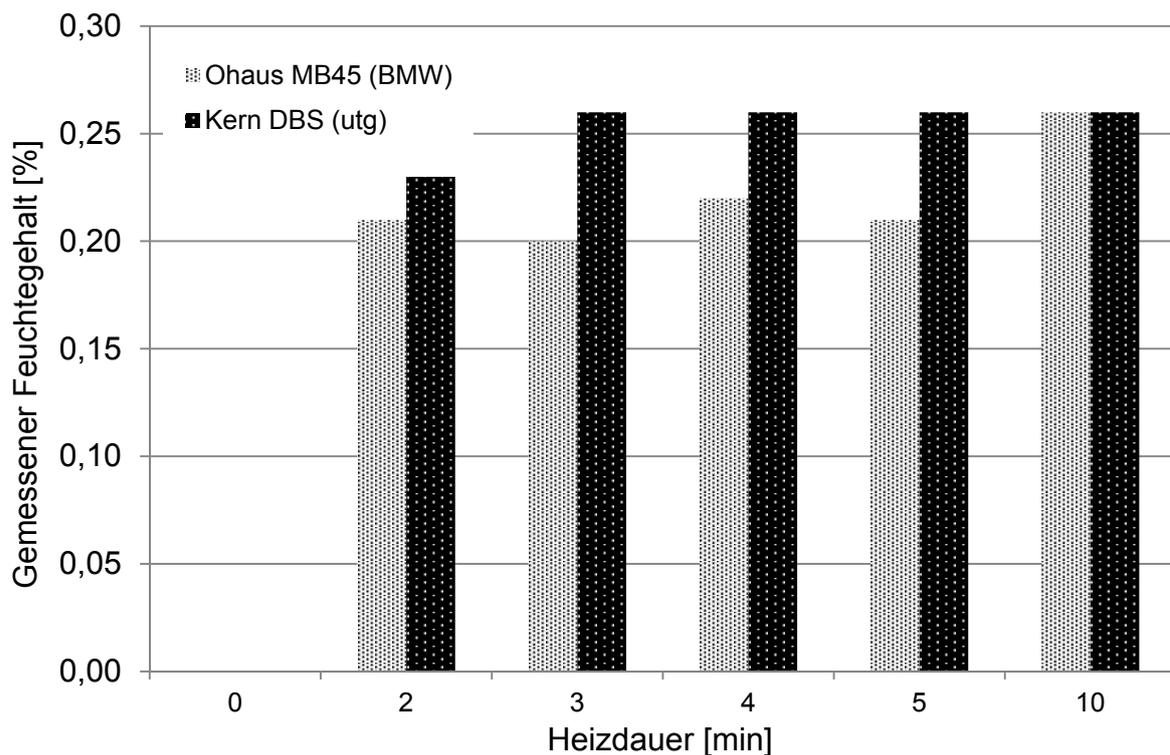


Diagramm 3: Vergleichsmessungen des Feuchtegehalts von Serienkernen der BMW Leichtmetallgießerei

Die Messergebnisse zeigen, dass das utg-Messsystem zwar etwas schneller die Feuchtigkeit austreibt, sich jedoch nach einer Trocknungszeit von 10 Minuten bei 200°C die Werte gleichen. Somit konnte die Messung des Feuchtegehalts erfolgreich validiert werden.

Neben der Festigkeit und des Feuchtegehalts stellt die Gasdurchlässigkeit eines Kern ein entscheidendes Qualitätsmerkmal dar. Nur wenn ein Kern eine ausreichend hohe Gasdurchlässigkeit besitzt, kann gewährleistet werden, dass beim Abguss entstehende Gase (z.B. Wasserdampf) über den Kern entweichen können und nicht in Gasporen im Gussteil resultieren. Die Prüfung der Gasdurchlässigkeit erfolgte mit dem im Rahmen des Projekts angeschafften Gasdurchlässigkeitsprüfgerät gemäß des VDG Merkblatts P41. Mit Hilfe eines von der BMW Leichtmetallgießerei in Landshut gefertigten Werkzeugs konnten Referenzprüflinge für die Bestimmung der Gasdurchlässigkeit hergestellt werden. Diagramm 4 stellt die Gasdurchlässigkeitszahlen zweier Kernsande dar, die sich aktuell bei der BMW Leichtmetallgießerei im Einsatz befinden. Hierzu wurden jeweils 6 Prüflinge der jeweiligen Mischungen untersucht.

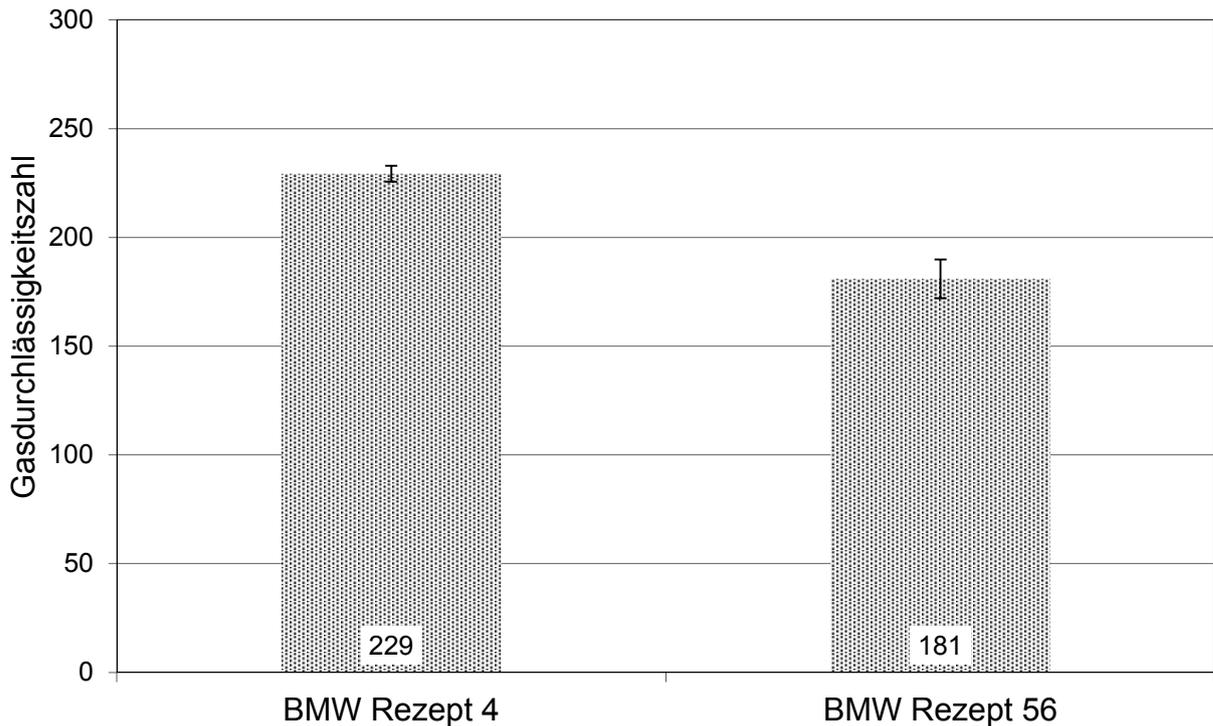


Diagramm 4: Vergleich der Gasdurchlässigkeitszahlen zweier bei BMW eingesetzten anorganischen Kernsanden

Die Gasdurchlässigkeit des BMW Rezepts 56 stellt im Folgenden den Zielwert für die am utg gedruckten Kernprüflinge dar.

Mit der erfolgreichen Durchführung der Referenzmessungen der Biegefestigkeit, des Feuchtegehalts und der Gasdurchlässigkeit an geschossenen Serienprüflingen der BMW Leichtmetallgießerei konnte das Arbeitspaket 2 ebenfalls vollständig abgeschlossen werden.

### 5.3 AP 3: Sand und Bindersysteme

In Vorarbeiten zu dem laufenden Projekt konnte die Firma Voxeljet in Zusammenarbeit mit der Firma Hüttenes-Albertus bereits ein anorganisches Materialsystem entwickeln, welches sich grundsätzlich für den 3D-Druckprozess eignet. Dieses Materialsystem lehnt sich an – im Serieneinsatz befindliche Systeme an – weicht aber in einigen Besonderheiten ab um die Eigenschaften des 3D-Drucks zu berücksichtigen.

Basis des Systems ist ein trockenes Sand- und Wasserglaspulvergemisch, das durch ein wässriges Druckmedium gelöst und gebunden wird. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Sand. Dieser hat im Vergleich zu üblichen Gießereiformstoffen ein wesentlich feineres Mittelkorn (ca. 170µm). Zudem ist die Korngestalt abgerundet. Die mineralische Basis ist Quarz, so dass eine gute Vergleichbarkeit mit im Serieneinsatz befindlichen Formstoffen gegeben ist. Das Wasserglaspulver ist wesentlich feindisperser (ca. 30µm) und „umhüllt“ im trockenen Zustand das Sandkorn gleichmäßig. So ist beim Zutritt des Flüssigbinders eine schnell und gleichmäßige Bildung von Binderbrücken zwischen den Sandkörnern gewährleistet. Der Flüssigbinder enthält Additive zur Rheologiesteuerung und zur Benetzung, da reines Wasser mit der Piezotintenstrahl Drucktechnik nicht verarbeitet werden kann.

Diese Additive sind silikatischer Natur, damit kein organischer Anteil dem System zugegeben wird. Die Druckflüssigkeit wird basisch eingestellt.

Die Reaktion der Partner findet nach dem Aufdrucken statt. Das Wasserglas wird gelöst und geliert zwischen den Sandkörnern. Diese Reaktion wird durch die IR-Lampe begünstigt. Ein Teil der Festigkeit wird durch das Abtrocknen des Binders und Umkristallisieren des Wasserglasses zwischen den Sandkörnern erreicht. Durch den Luftzutritt tritt ebenso die Härtingsreaktion des Wasserglasses ein, die zu einem wasserunlöslichen Produkt führt.

Ein 3D-Drucker vom Typ VX-500 wurde am Lehrstuhl utg mit dem beschriebenen Materialsystem in Betrieb genommen, welches in den genannten Vorarbeiten von Voxeljet die besten Verarbeitungs- und Bauteileigenschaften hervorbrachte. Dieses Materialsystem wird im Folgenden mit dem Namen VX-AOB bezeichnet. In dem Arbeitspaket 3 sollte eine systematische Variation des Sand-Binder-Systems durchgeführt werden. Um diese strukturiert und zielführend durchzuführen, muss gewährleistet sein, dass mit dem Ausgangsmaterialsystem VX-AOB über das gesamte Baufeld der Anlage homogene Prüflinge – wie sie für die Ursache-Wirkungs-Analyse erforderlich sind – in einer ausreichenden Menge erzeugt werden können. Vorversuche des Arbeitspakets 4 zeigten, dass diese Bedingung nicht erfüllt ist und weitere Anpassungen an der Anlagentechnik notwendig sind. Der Abschnitt 5.4 beschreibt detailliert die Problematik der Baufeldinhomogenität und welche Abhilfemaßnahmen getroffen wurden. Aufgrund dieser prozessbedingten Baufeldinhomogenität haben die Firma Voxeljet und der Lehrstuhl utg gemeinsam beschlossen eine Priorisierung des Arbeitspakets 4 vorzunehmen.

Im Hause voxeljet wurde das bestehende Materialsystem zur Optimierung der Eigenschaften in seiner Zusammensetzung variiert. Dabei wurden verschiedene Konzentrationen von trockenem Wasserglas, Zement und unterschiedlicher Formgrundstoffe eingesetzt. Zusätzlich wurde der verfahrenstechnische Mischprozess untersucht. Ergebnis dieser Untersuchungen ist das Sand-Binder-System VX-AOB 2. Hierbei wird ein höherer Bindergehalt eingesetzt. Zudem wird das System mithilfe einer Kugelmühle aufbereitet. Gedruckte Prüflinge zeigen deutliche Verbesserungen bezüglich der Festigkeit und der Geometrie. Ebenso sind geringere Glühverluste (Feuchtegehalte) darstellbar, die sich positiv auf den Gießbarkeit auswirken sollten. Die Übertragung des weiterentwickelten Sand-Binder-Systems auf die VX-500 Anlage am Lehrstuhl utg wurde im Mai 2013 durchgeführt. Die positiven Untersuchungen der Firma Voxeljet mit dem weiterentwickelten Sand-Binder-System konnten in darauffolgenden Versuchsreihen am Lehrstuhl utg bereits bestätigt werden.

#### **5.4 AP 4: Prozessparameter**

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, haben die Firma Voxeljet und der Lehrstuhl utg gemeinsam eine Priorisierung des Arbeitspakets 4 beschlossen. Der folgende Abschnitt legt die Gründe dieser Priorisierung ausführlich dar und zeigt, welche Maßnahmen abgeleitet und wie diese umgesetzt wurden. Der im Folgenden detailliert beschriebene Effekt der Baufeldinhomogenität machte eine substantielle Erweiterung des Arbeitspakets 4 notwendig. Die Bestandteile dieser Erweiterung sind in Abbildung 9 beschrieben.



Abbildung 9: Erweiterung des Arbeitspakets 4

Zu Beginn des Arbeitspakets 4 wurde die Baufeldinhomogenität identifiziert und als sehr relevant für die Bauteileigenschaften eingestuft. Hierauf folgten die Integration der Prozessüberwachung und die Anpassung des Heizkonzepts. Mit dem angepassten Heizkonzept wurde ein neuer Istzustand der Anlage ausführlich dokumentiert. Den Abschluss des Arbeitspakets 4 bildete die Korrelation der Prozessparameter mit den in Arbeitspaket 2 definierten Prüfgrößen.

#### Identifikation der Baufeldinhomogenität

Der zentrale Bestandteil des Arbeitspakets 4 ist die Variation der Prozessparameter. Zu diesen Parametern gehören beispielsweise der Flüssigkeitseintrag, die Leistung der Heizlampe oder die Schichtzeit. Eine strukturierte und zielführende Variation dieser und weiterer Prozessparameter setzt voraus, dass gedruckte Prüflinge unabhängig von ihrer Lage im Baufeld homogene Eigenschaften aufweisen. Ist dies nicht der Fall, überlagert der Einfluss der Lage des Prüflings im Baufeld die Auswirkungen eines variierten Parameters. Vorversuche zeigten, dass eine solche Abhängigkeit der Lage eines Prüflings von seiner Position im Baufeld besteht. So zeigte der Prüfling *Diffusion* (vgl. Abbildung 4) deutliche Unterschiede in der Menge an Anhaftungen (sog. Diffusion) in Abhängigkeit von seiner Lage im Baufeld. Der Prüfling in der Mitte des Baufelds zeigte deutlich weniger Diffusion als eine Geometrie, die an dessen Rand gedruckt wurde. Abbildung 10 zeigt eine vergrößerte Aufnahme des Prüflings in der Mitte und des in der Ecke des Baufelds gedruckten Teils, welche die drastischen Unterschiede verdeutlicht.

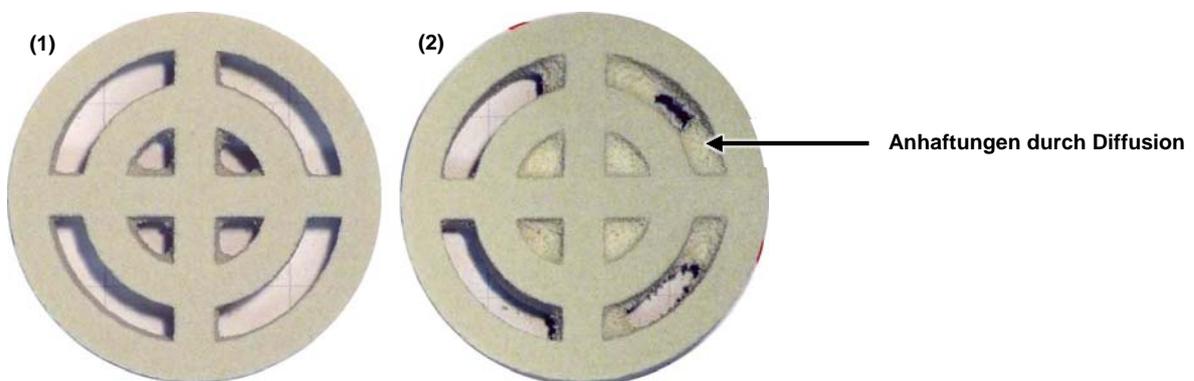


Abbildung 10: Prüfling *Diffusion*, der in der Mitte des Baufelds (1) und in der Ecke des Baufelds (2) gedruckt wurde.

Dieser Effekt der Diffusion stellt eine große Herausforderung dar, da die Sandanhaftungen für eine starke Abweichung der Maßhaltigkeit und eine gravierende Verschlechterung der Oberflächenqualität Sorge tragen. Die Abhängigkeit der Bauteileigenschaften von ihrer Lage im Baufeld wurde bereits in vorangegangenen Versuchsreihen der Firma Voxeljet beobachtet. Jedoch konnte bislang keine verlässliche Aussage zu der Ursache getroffen werden. Dieses Phänomen konnte durch den Einsatz der Wärmebildkamera des Lehrstuhls utg näher untersucht werden. Als Ursache für diese unterschiedlichen Prüflingsqualitäten konnte die inhomogene Ausprägung der Baufeldtemperatur nachgewiesen werden. Durch die temporäre Demontage der Frontscheibe der Anlage ist es möglich

mit der Wärmebildkamera die Temperaturverteilung auf dem Baufeld während des Druckprozesses zu beobachten und aufzuzeichnen. Das Setup dieses Vorversuchs ist in Abbildung 11 dargestellt.

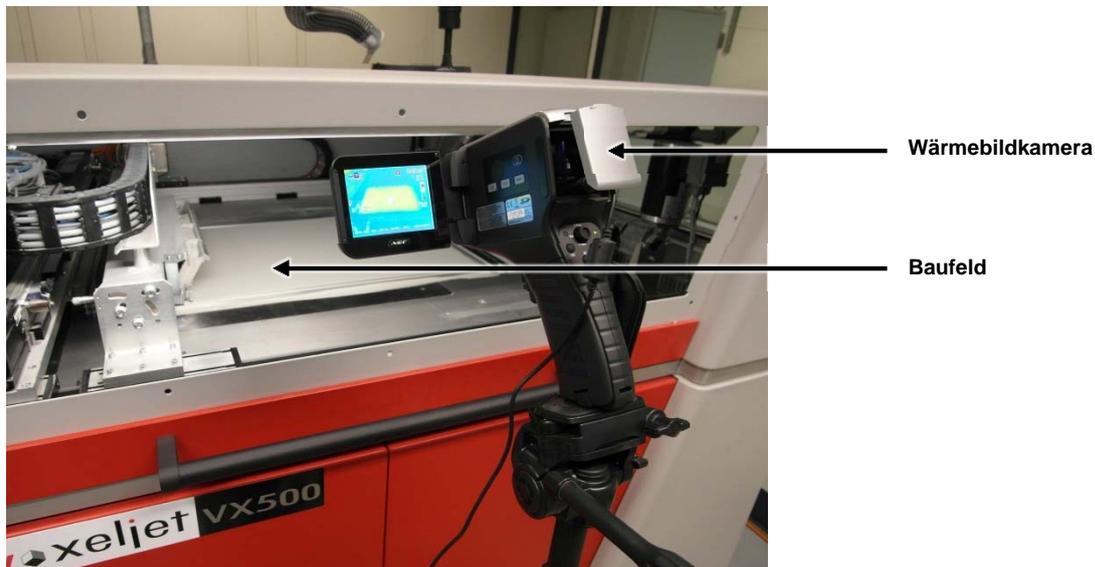


Abbildung 11: Aufbau der Wärmebildkamera mit Blick auf das Baufeld

Das Ergebnis sind Thermographieaufnahmen, -videos und Messkurven mit deren Hilfe der Prozess näher untersucht werden kann. Sämtliche Thermographieaufnahmen wurden mit einem Emissionsgrad von  $\epsilon=1$  durchgeführt, da nicht die absolute Temperatur sondern relative Temperaturunterschiede im Fokus der Untersuchungen standen. Beispielhaft zeigt Abbildung 12 eine Thermographieaufnahme, die während des Bauprozesses aufgenommen wurde.

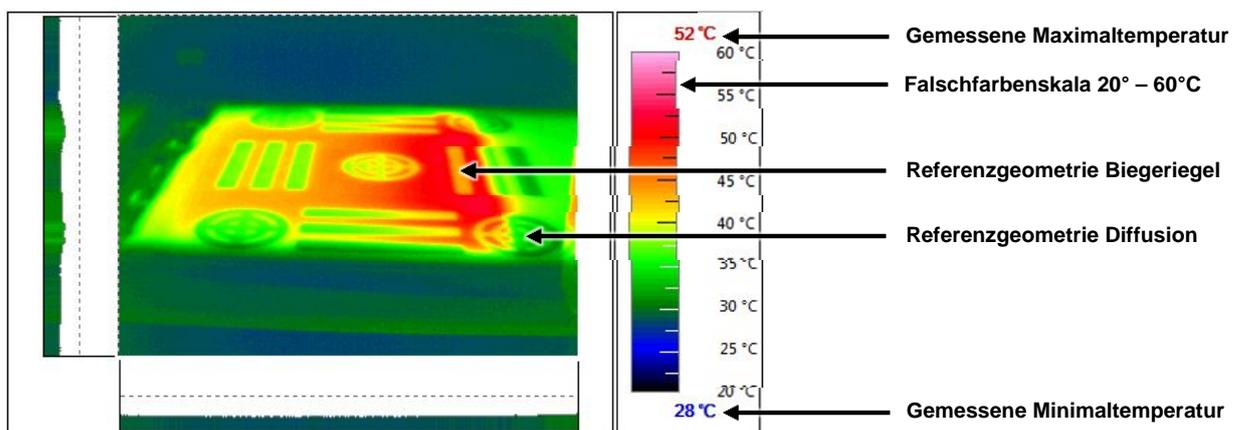


Abbildung 12: Wärmebildaufnahme während des Bauprozesses in der VX-500 Anlage. Anhand der Falschfarbendarstellung ist die inhomogene Temperaturverteilung auf der Baufeldoberfläche deutlich zu erkennen.

Die Baufeldmitte erwärmt sich stärker, währenddessen am Rand ein deutlicher Temperaturabfall zu verzeichnen ist. Ebenso ist von links nach rechts zunächst ein Anstieg und dann ein drastischer Abfall der Temperatur zu verzeichnen.

In denen – diesem Projekt vorangegangenen Arbeiten – hat die Firma Voxeljet eine Infrarot-Heizlampe entwickelt und in die Anlage integriert. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, ist die Erwärmung

des Sand-Binder-Systems ein essentieller Bestandteil des Verfahrens. Mit Hilfe der Ergebnisse der Thermographiemessungen am utg konnte erstmals die inhomogene Erwärmung des Baufeldes visualisiert und quantifiziert werden.

Um die inhomogene Baufeldtemperatur klar als Ursache der inhomogenen Bauteileigenschaften herauszustellen, wurde ein Prinzipversuch ohne den Einsatz der Heizlampe durchgeführt. Eine Momentaufnahme dieses Prozesses ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Position aus der diese Aufnahme gemacht wurde, wird in dem Abschnitt „Integration Prozessüberwachung“ näher beschrieben.

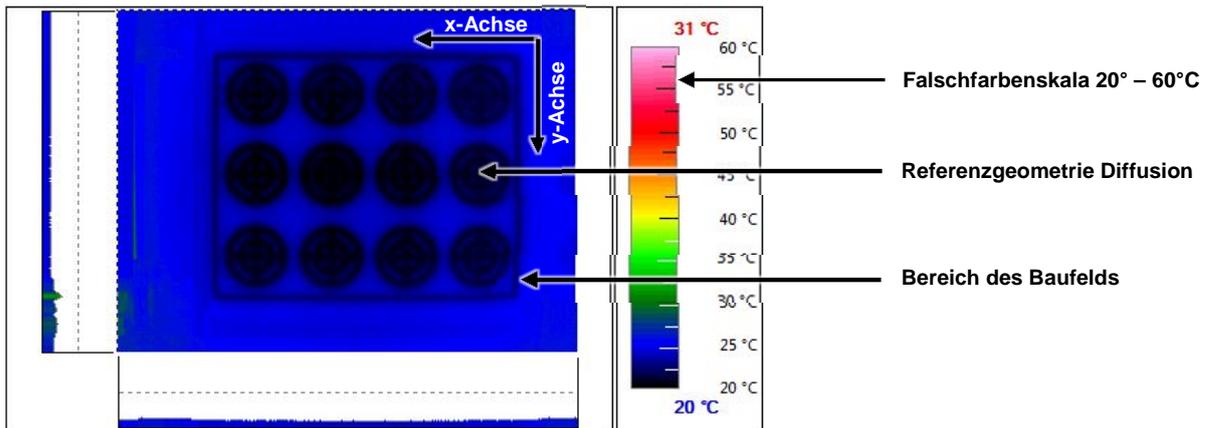


Abbildung 13: Job mit 12 Diffusionsproben der ohne den Einsatz der Heizlampe gedruckt wurde. Die Prüflinge haben unabhängig von ihrer Lage im Baufeld die gleiche Temperatur.

Prüflinge des Typs *Diffusion*, die an 12 unterschiedlichen Positionen in der Jobbox gedruckt wurden, weisen während des Druckprozesses eine nahezu identische Temperatur auf. Diese Temperatur liegt aufgrund der Verdunstungskälte geringfügig unterhalb der Raumtemperatur. Im Rahmen des Prinzipversuchs wurden die Prüflinge optisch bewertet und mittels einer Feinwaage gewogen. Da mit zunehmender Diffusion auch das Gewicht der Prüflinge zunimmt, eignet sich diese Messgröße sehr gut um die Diffusion zu quantifizieren. Um größere statistische Sicherheit der Messwerte zu erzielen, wurde dieser Prinzipversuch mehrmals durchgeführt. Abbildung 14 zeigt beispielhaft eine Fotografie des fertig gedruckten Jobs.

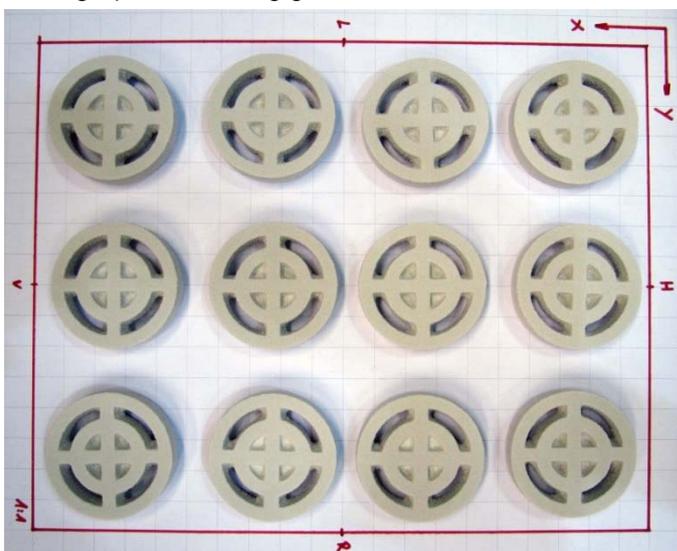


Abbildung 14: Fotografie eines der Jobs die als Prinzipversuch ohne den Einsatz der Heizlampe gedruckt wurden. Alle Prüflinge zeigen unabhängig von ihrer Lage in der Jobbox ähnlich starke Diffusion.

Unabhängig von ihrer Lage im Baufeld zeigen die Diffusionsprüflinge homogene Eigenschaften. Dieser optische Befund ließ sich durch die Gewichtsbestimmung der Prüflinge bestätigen. Daher lässt sich mit großer Sicherheit sagen, dass die inhomogene Baufeldtemperatur während des Bauprozesses die Hauptursache für die inhomogenen Bauteileigenschaften darstellt.

#### Integration Prozessüberwachung

Die beschriebene Baufeldinhomogenität und ihre Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften verdeutlicht die Notwendigkeit Anpassungen am Heizkonzept der Anlage vorzunehmen. Eine aufschlussreiche Parametervariation kann nur durchgeführt werden, wenn ihr stabile, klar definierte Ausgangsbedingungen zugrunde liegen. In diesem Fall ist eine hinreichende Homogenität der gedruckten Teile – unabhängig von ihrer Position in der Jobbox – erstrebenswert. Nur so lassen sich die variierten Parameter verlässlich mit den Eigenschaften der gedruckten Bauteile korrelieren. Um den Erfolg von Anpassungen des Heizkonzepts bewerten zu können musste eine Prozessüberwachung in die Anlage integriert werden. Der folgende Abschnitt beschreibt die Umbaumaßnahmen, die an der VX-500 Anlage am Lehrstuhl utg vorgenommen wurden. Der in Abbildung 11 dargestellte Vorversuch, bei dem eine Wärmebildkamera durch die demontierte Frontscheibe der Anlage auf das Baufeld gerichtet wurde, zeigt deutlich, dass sich die inhomogene Baufeldtemperatur sehr gut mit dieser Methode visualisieren lässt. Jedoch ist durch den flachen Blickwinkel der Kamera nur eine räumlich verzerrte und teilweise unscharfe Dokumentation des Baufelds (vgl. Abbildung 12) möglich. Daher wurde ein Konzept erarbeitet, mit dem sich eine senkrechte – und dadurch verzerrungsfreie und scharfe – Aufnahme der Baufeldtemperatur realisieren lässt. Die Konstruktion, die Fertigung und die Inbetriebnahme erfolgten am Lehrstuhl utg im Zeitraum von Oktober 2012 bis Januar 2013. Das Ergebnis der Umbaumaßnahme ist in Abbildung 15 zu sehen.

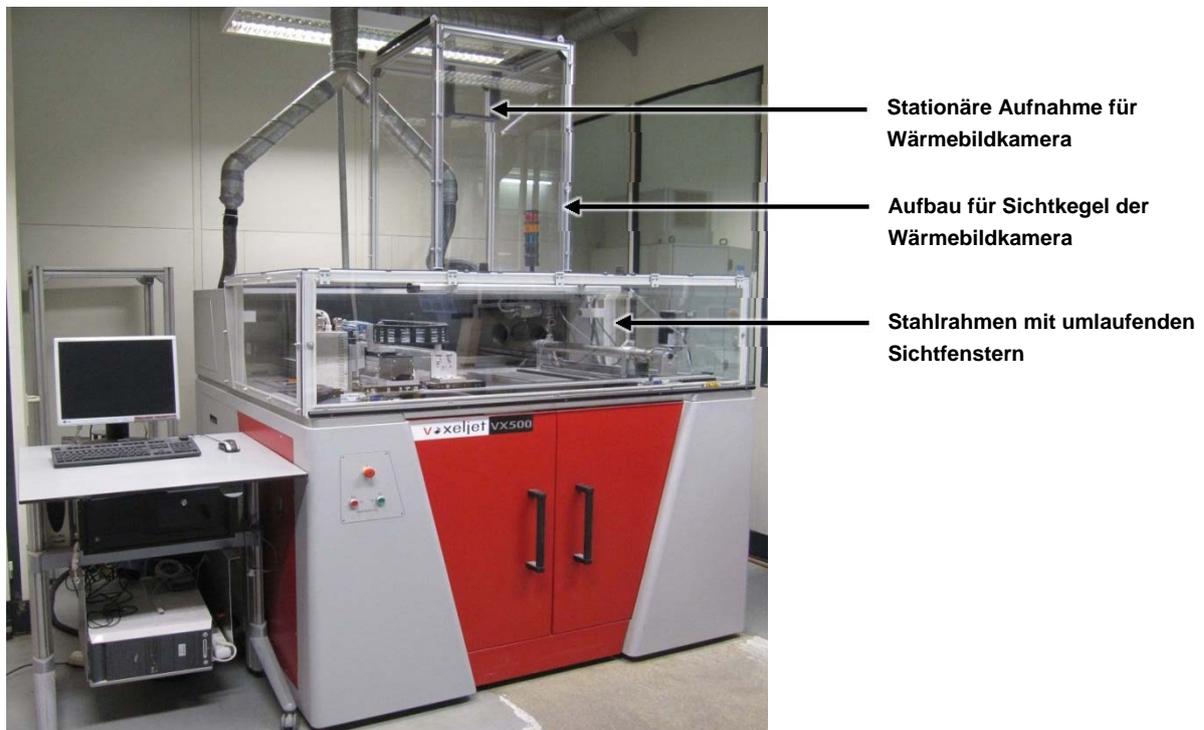


Abbildung 15: RP-Anlage vom Typ VX-500 nach dem Umbau zur Integration der Prozessüberwachung

Aus dem gegebenen Öffnungswinkel der Wärmebildkamera ergibt sich eine genaue Position der Kamera im Raum über der Anlage, die es ermöglicht das gesamte Baufeld aufzunehmen. Diese Position befindet sich ca. 120 cm oberhalb der Baufeldmitte. Um die Wärmebildkamera an dieser Stelle positionieren zu können, wurde eine geschweißte Stahlkonstruktion mit einer variablen Aluminium-Profilkonstruktion kombiniert. Der standardmäßig zu der Anlage gehörige Deckel wurde demontiert und am Lehrstuhl utg eingelagert. Somit ist – falls notwendig – jederzeit eine Wiedermontage des Originaldeckels möglich.

Wie in Abbildung 11 gezeigt, konnte vor den Umbaumaßnahmen die Wärmebildkamera lediglich vor der Anlage auf einem Stativ positioniert werden. Durch den flachen Blickwinkel bei dieser Anordnung ließen sich keine auswertefähigen Aufzeichnungen des Prozesses aufnehmen (vgl. Abbildung 12). Den Erfolg der Umbaumaßnahmen zur Integration der Wärmebildkamera in den Deckel der Anlage zeigt Abbildung 16 anhand eines Beispieljobs bei dem die Prüflinge *Biegeriegel*, *Diffusion* und *Feuchtegehalt* gedruckt werden.

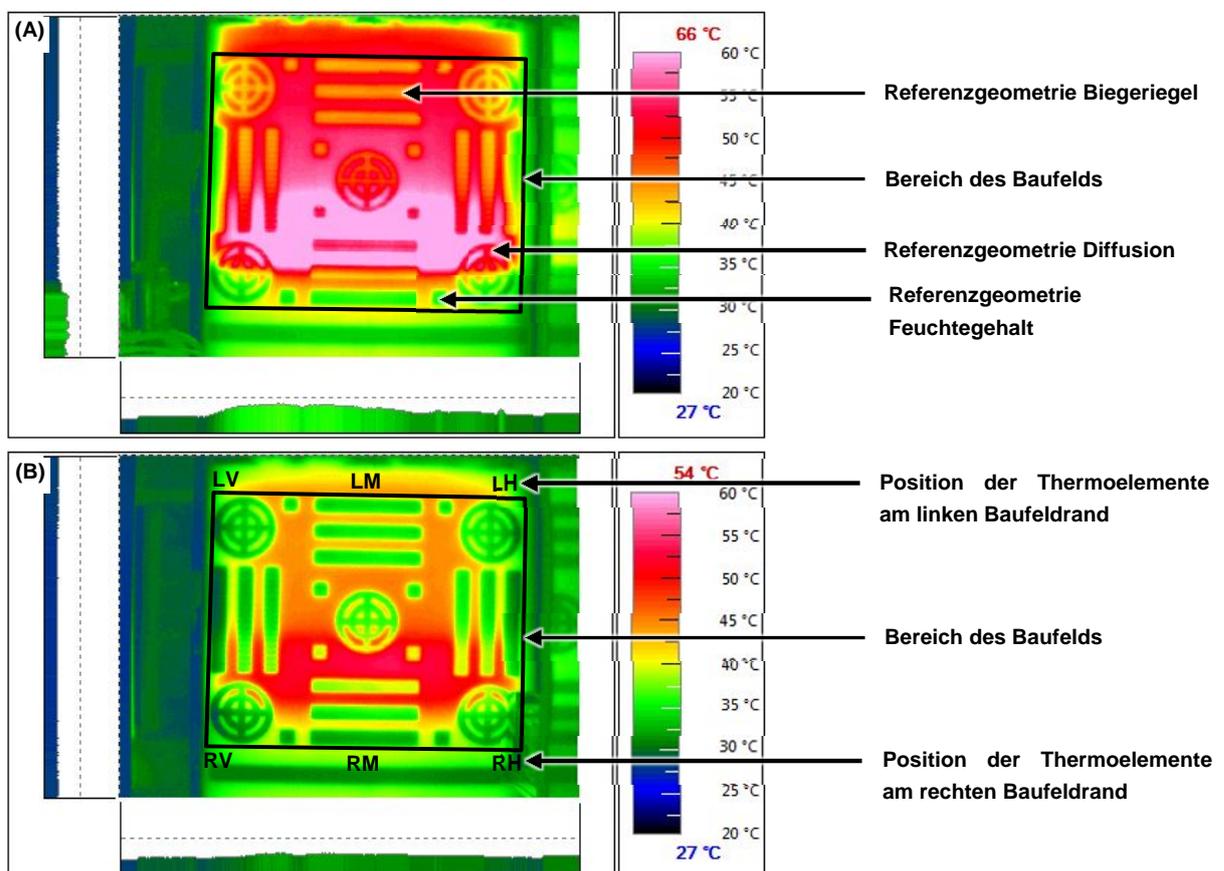


Abbildung 16: Wärmebilder des Baufelds nach dem Beheizen (A) und nach dem Bedrucken (B) einer Schicht.

Die exakt senkrechte und mittige Position der Wärmebildkamera über dem Baufeld ermöglicht eine einwandfreie Aufnahme des Bauprozesses. Die zuvor beschriebene Inhomogenität der Baufeldtemperatur lässt sich durch diese Visualisierungsmöglichkeit noch stärker verdeutlichen. Die Wärmebildkamera ist in der Lage – mit verschiedenen zeitlichen Auflösungen – vollradiometrische Daten aufzuzeichnen. Aus diesen Daten lässt sich der Temperaturverlauf an jedem Bildpunkt auslesen und auswerten.

Zusätzlich zu der Aufnahme für die Wärmebildkamera wurde eine Prozessüberwachung mittels sechs Thermoelementen in die Anlage integriert. Diese Thermoelemente befinden sich innerhalb der Anlage und liefern zuverlässige Langzeitdaten über die Temperatur des Sandbetts an 6 Randpositionen des Baufelds. Abbildung 17 verdeutlicht die Anordnung der Thermoelemente an den Positionen links-vorne (LV), links-mitte (LM), links-hinten (LH), sowie rechts-vorne (RV), rechts-mitte (RM) und rechts-hinten (RH).

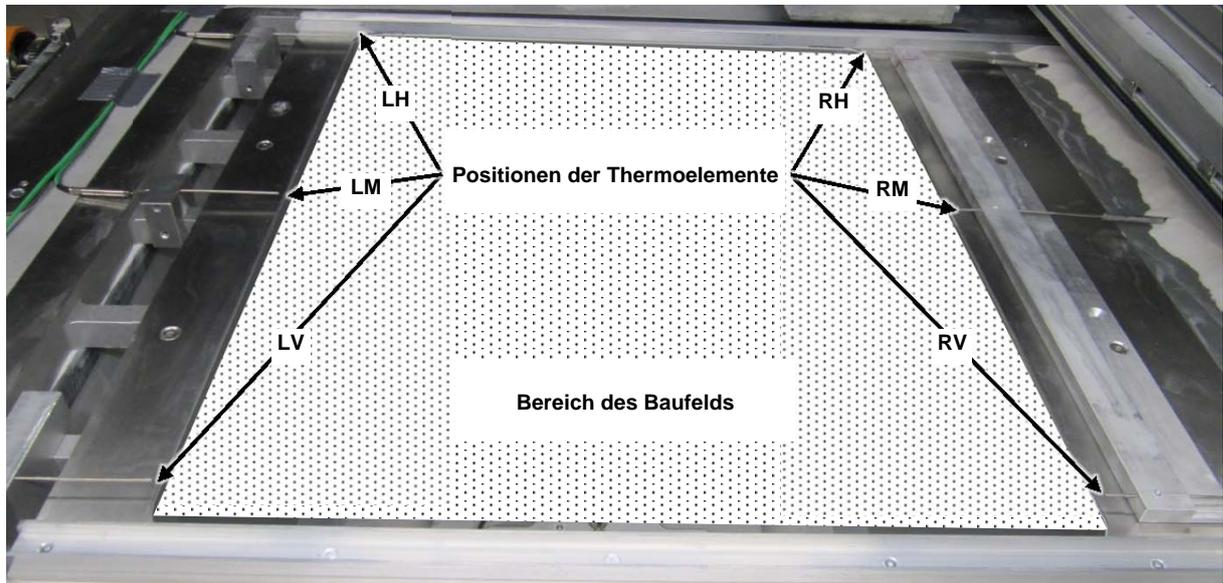


Abbildung 17: Sicht auf das Baufeld. Die Thermoelemente sind an dessen linken (L) und rechten (r) Rand jeweils vorne (V), mittig (M) und hinten (H) positioniert.

Eine Messung der Temperatur mittels Thermoelementen innerhalb des Bereichs des Baufelds ist nicht möglich, da sie mit bereits bedruckten Bereichen kollidieren würden. Obwohl sie außerhalb der Jobbox angeordnet sind, stellen die Daten der Thermoelemente eine wertvolle Informationsquelle dar um den Temperaturhaushalt des Sandbetts zu überwachen und zu bewerten. Diagramm 5 veranschaulicht die aufgezeichneten Daten der 6 Thermoelemente, die die Temperatur ca. 3 mm unterhalb der Baufeldoberfläche aufzeichnen.

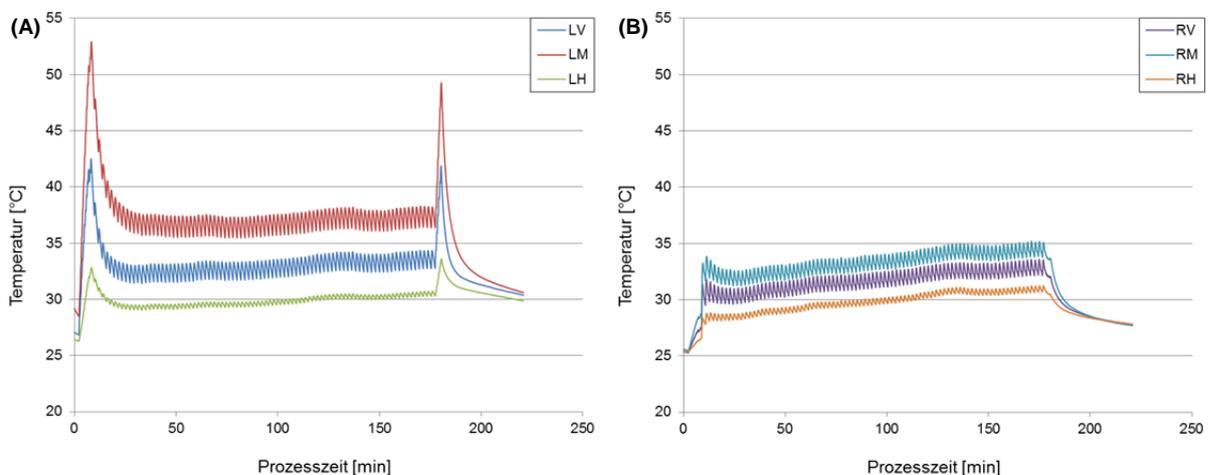


Diagramm 5: Aufzeichnungen der Temperatur am linken (A) und rechten (B) Baufeldrand, die durch die Integration der Thermoelemente ermöglicht wurde.

Die Auftragungen der Temperatur über die Prozesszeit veranschaulichen – wie zuvor die Aufnahmen der Wärmebildkamera – die großen Unterschiede der Baufeldtemperatur. Während der 10 Startschichten, die der Recoater zu Beginn des Prozesses auf das Baufeld aufbringt, kommt es zu einer starken Erwärmung der Thermoelemente am linken Baufeldrand. Jeder Zyklus (Belichten + Recoaten / Bedrucken) verursacht einen Anstieg und einen Abfall der Temperatur. Daraus ergibt sich das oszillierende Muster der Temperatur welches bei allen Thermoelementen zu beobachten ist.

#### Anpassung Heizkonzept

Mithilfe der neu integrierten Prozessüberwachung lassen sich aus jedem Job Daten gewinnen, mit denen sich strukturiert Zusammenhänge zwischen der Lage eines Prüflings in der Jobbox und seinen Eigenschaften ableiten lassen. Die gewonnenen Temperaturdaten verdeutlichen die Notwendigkeit einer Anpassung des Heizkonzepts. Folgende Anpassungen wurden vorgenommen:

- Verschiebung des Heizbereichs der Heizlampe in y-Richtung
- Ausdehnung des Heizbereichs der Heizlampe
- Umkehr der Druckrichtung des Druckkopfs
- Anpassung der Heizgeschwindigkeit (Verfahrgeschwindigkeit Recoaterachse)

Die vorgenommenen Maßnahmen beschränkten sich ausschließlich auf Änderungen der Steuerungssoftware der Anlage. Abbildung 18 zeigt eine Momentaufnahme der Wärmeverteilung auf dem Baufeld nach Umsetzung der Änderungen.

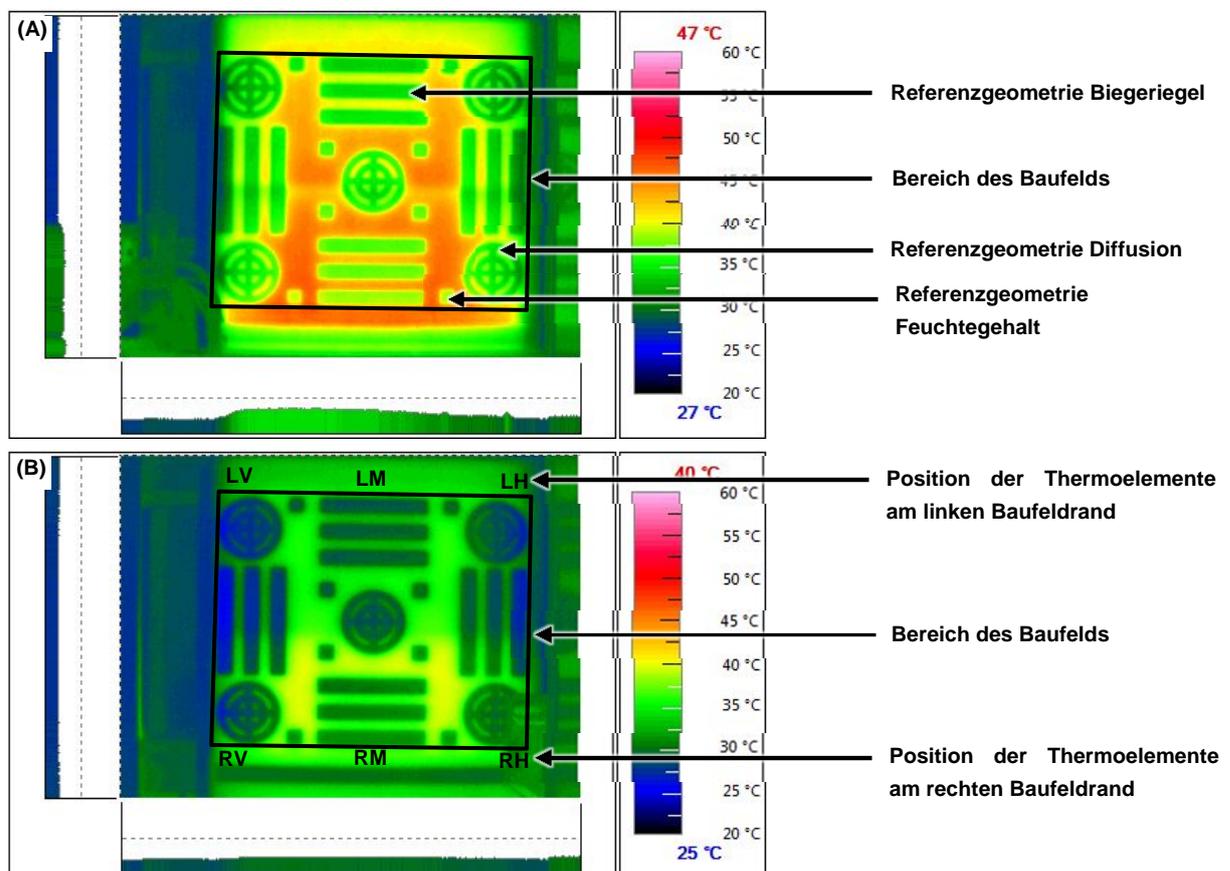
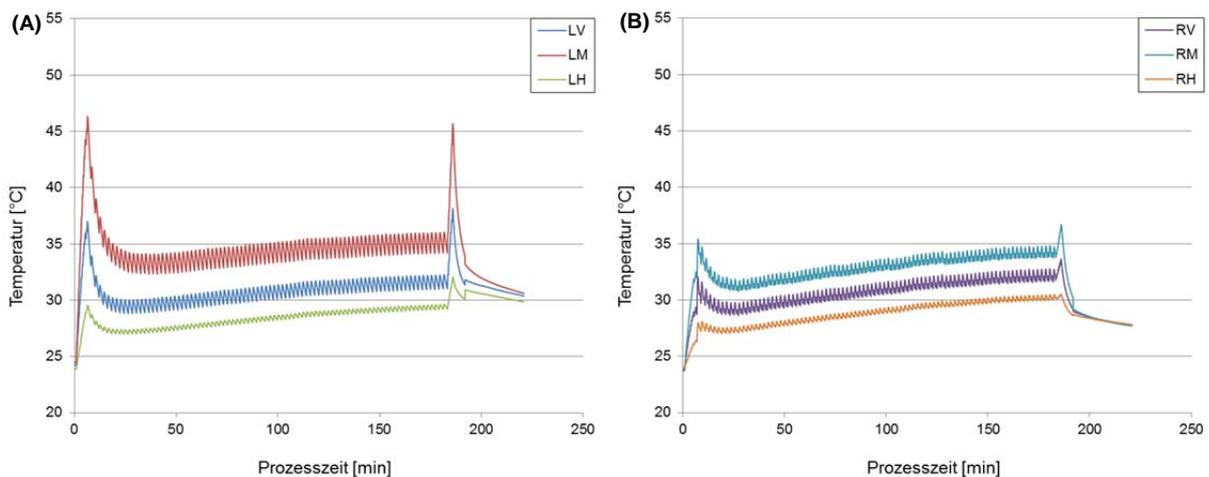


Abbildung 18: Wärmebilder des Baufelds aufgenommen nach der Anpassung des Heizkonzepts. Temperaturverteilung nach dem Beheizen (A) und nach dem Bedrucken (B) einer Schicht.

Durch Veränderungen am Geschwindigkeitsprofil des Recoaters – an dem die Heizlampe montiert ist – kann der Wärmeeintrag innerhalb gewisser Grenzen gesteuert werden. Die Ergebnisse dieser Anpassung des Heizkonzepts konnten mithilfe der neu integrierten Prozessüberwachung detailliert aufgezeichnet und ausgewertet werden.

Beim Vergleich der Wärmebildaufnahmen vor (Abbildung 16) und nach (Abbildung 18) der Anpassung des Heizkonzepts ist die gesteigerte Homogenität des Wärmeeintrags deutlich zu erkennen. Diesen positiven Effekt zeigen ebenso die Aufzeichnungen der 6 Thermoelemente, deren Messkurven in Diagramm 6 dargestellt sind.



**Diagramm 6:** Aufzeichnungen der Temperatur am linken (A) und rechten (B) Baufeldrand, die durch die Integration der Thermolemente ermöglicht wurde.

Die aufgenommenen Prozessdaten belegen, dass eine deutlich höhere Baufeldhomogenität erreicht werden konnte. Der softwaretechnischen Anpassung des Heizkonzepts sind jedoch Grenzen gesetzt. So geht die erreichbare Homogenität mit einem – im Gesamten – geringeren Wärmeeintrag einher. Ebenso ist in den Randbereichen der Jobbox nach wie vor ein Temperaturabfall zu verzeichnen. Diese Effekte sind ebenso den Prozessdaten zu entnehmen. Um diese Grenzen zu überwinden, ist eine Umrüstung der Baufeldheizung mit einer leistungsfähigeren und steuerbaren Heizlampe im weiterführenden Projekt geplant. Details zu dieser beantragten Maßnahme sind dem Projektantrag für die 2. Phase (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2 – 2) zu entnehmen.

### Aufnahme Istzustand

Die detaillierte Dokumentation des Istzustandes nach denen, im vorherigen Abschnitt beschriebenen Anpassungen des Heizkonzepts, bildet die Basis für die darauffolgende Korrelation der Prozessparameter mit den Prüfgrößen. Die Aufnahme des Istzustandes erfolgt anhand von folgenden Prüfgrößen:

- 1) Biegefestigkeit x-Richtung
- 2) Biegefestigkeit y-Richtung
- 3) Feuchtegehalt
- 4) Diffusion
- 5) Gasdurchlässigkeit

Jobs, die diese Prüflinge enthalten, werden jeweils drei Mal unter identischen Prozessbedingungen gebaut und die Prüflinge den entsprechenden Prüfungen unterzogen. Die neu integrierte Prozessüberwachung erlaubt dabei die Kontrolle der gleichbleibenden Prozessbedingungen.

#### Korrelation: Parameter ↔ Prüfgrößen

Aufbauend auf dem definierten Istzustand der Anlage erfolgte die Korrelation der zuvor genannten Prüfgrößen mit den, an der Anlage eingestellten, Prozessparametern. Die Ergebnisse dieser Korrelation werden im Folgenden dargestellt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf den Einfluss der Heizlampe auf die Qualitätsmerkmale gelegt, da sich dieser Prozessparameter als äußerst relevant herausstellte.

Die Untersuchung der Biegefestigkeit (x- / y-Richtung) und des Feuchtegehalts erfolgten in einem Job. Dabei wurden 24 Stunden nach Fertigstellung der Prüflinge diese zunächst in der Festigkeitsprüfung im 3-Punkt-Biegeversuch unterzogen und danach der Feuchtegehalt der Bruchstücke mittels Trockenwaage bestimmt. Ohne den Einsatz der Heizlampe zeigten die gedruckten Prüflinge Feuchtegehalte zwischen 0,86 und 1,13% (6 Jobs). Mit dessen Einsatz konnten die Feuchtegehalte auf Werte zwischen 0,75 und 0,95% (6 Jobs) reduziert werden. Somit konnte gezeigt werden, dass der Einsatz der Heizlampe zu einer Verringerung des Feuchtegehalts führt, welche als positiv für die Gießbarkeit der Kerne anzusehen ist. An den identischen 12 Jobs wurde die 3-Punkt-Biegefestigkeit von Prüflingen gemessen, die wie in Abbildung 19 in der Jobbox angeordnet waren.

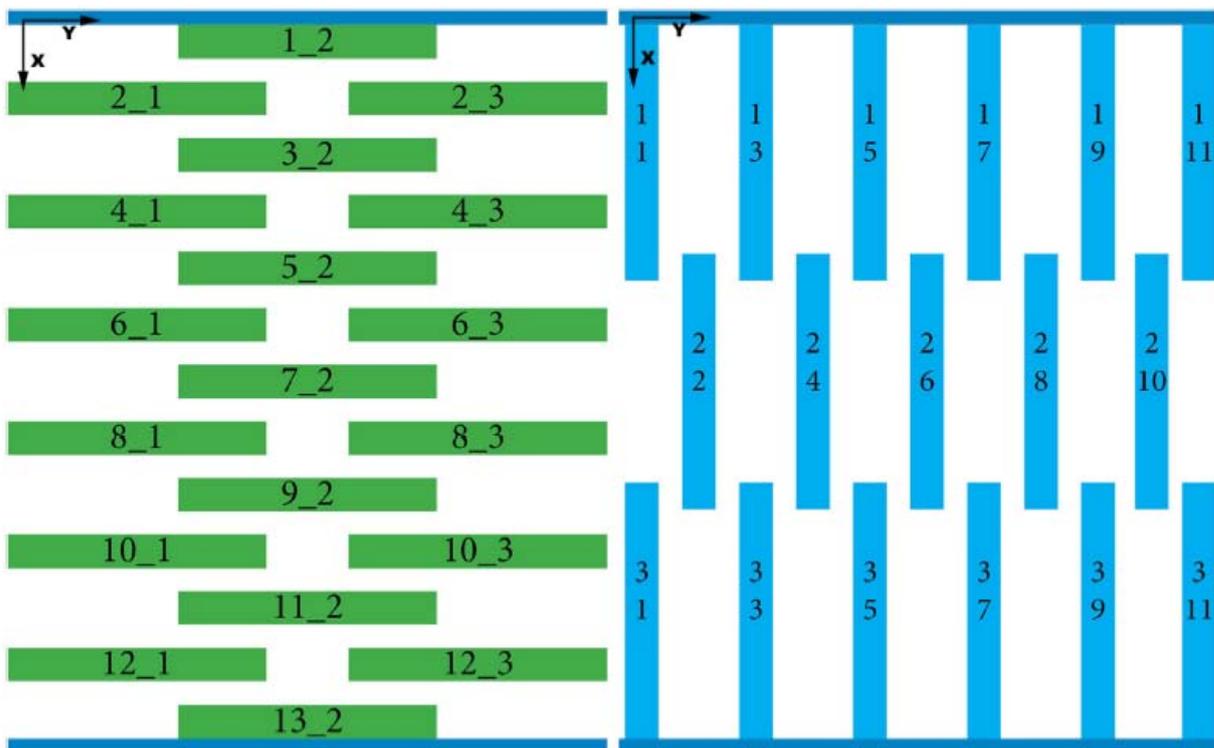
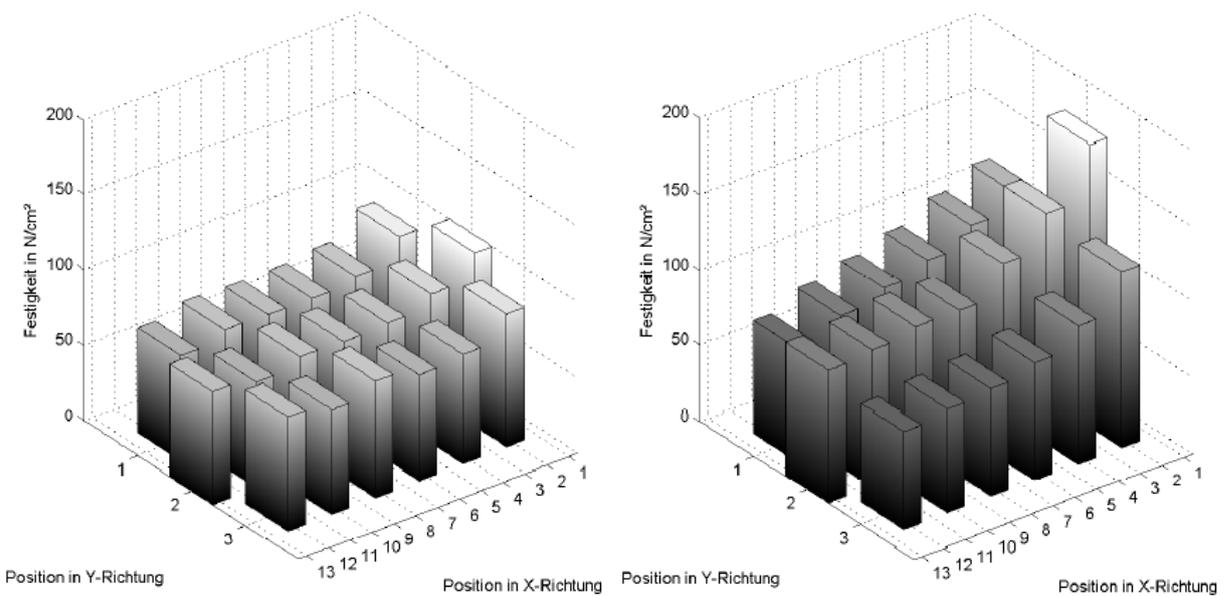


Abbildung 19: Anordnung der 3-Punkt-Biegung-Prüflinge in der Jobbox in y-Richtung (links) und in x-Richtung (rechts)

Hierbei wurden die Prüflinge so verteilt, dass eine möglichst große Abdeckung des Baufelds erreicht werden konnte. Diagramm 7 zeigt exemplarisch einen Vergleich der 3-Punkt-Biegefestigkeiten von Prüflingen, die in y-Richtung ohne und mit Einsatz der Heizlampe gedruckt wurden.



**Diagramm 7: Vergleich der 3-Punkt-Biegefestigkeiten in y-Richtung ohne (links) und mit (rechts) Einsatz der Heizlampe**

Es zeigte sich, dass sich ohne den Einsatz der Heizlampe die Festigkeiten auf einem niedrigen Niveau von ca. 60 N/cm<sup>2</sup> bewegten. Mit dem Einsatz der Heizlampe konnten die Festigkeiten um ein Vielfaches (vereinzelt bis auf ca. 200 N/cm<sup>2</sup>) gesteigert werden, wenngleich auch die Streuung der gemessenen Werte zunahm. Die höheren Festigkeiten, die durch den Einsatz der Heizlampe zu erzielen waren, sind auf die erhöhte Reaktivität des Bindersystems bei erhöhter Temperatur zurückzuführen. Jedoch kann durch die Heizlampe die Stabilität des Druckkopfs negativ beeinflusst werden. Dieser Effekt wird im Rahmen des Nachfolgeprojekts (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2 - 2) durch Anpassungen an der Hardware der Anlage behoben. Somit werden im Rahmen des Nachfolgeprojekts aussagekräftigere Messungen möglich, da der Einfluss der Druckkopfstabilität auf die Eigenschaften der gedruckten Prüfkörper minimiert werden kann. Ebenso wird im Rahmen des Nachfolgeprojekts eine weitere Optimierung der Baufeldheizung durchgeführt um den bereits beschriebenen, teils inhomogenen Wärmeeintrag in das Baufeld zu optimieren.

Ein weiteres, entscheidendes Qualitätsmerkmal stellt die sog. *Diffusion* dar. Sie beschreibt, in wie weit das eingebrachte Fluid in umliegende Bereiche diffundiert und somit zu Abweichungen in der Maßhaltigkeit der Teile (z.B. durch Sandanhaftungen) führt. Die Quantifizierung erfolgte anhand der bereits beschriebenen Diffusionsprüflinge. Hier wurde der Einfluss der Heizlampe ebenfalls an jeweils 3 Jobs herausgearbeitet, die ohne, bzw. mit dem Einsatz der Lampe gedruckt wurden. Als Bewertungskriterium wurde das Gewicht der gedruckten Prüflinge herangezogen, da es mit steigender Diffusion ebenfalls ansteigt. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen exemplarisch den Einfluss der Heizlampe auf das Qualitätsmerkmal Diffusion anhand von jeweils 12 Prüflingen, die über das Baufeld verteilt, gedruckt wurden.

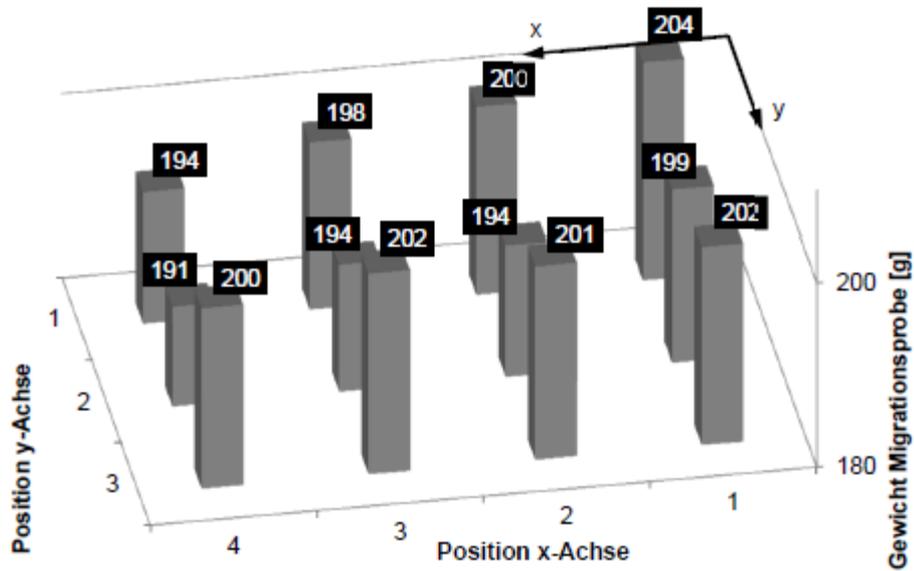


Diagramm 8: Gewichte der Diffusionsproben, die ohne den Einsatz der Heizlampe gedruckt wurden

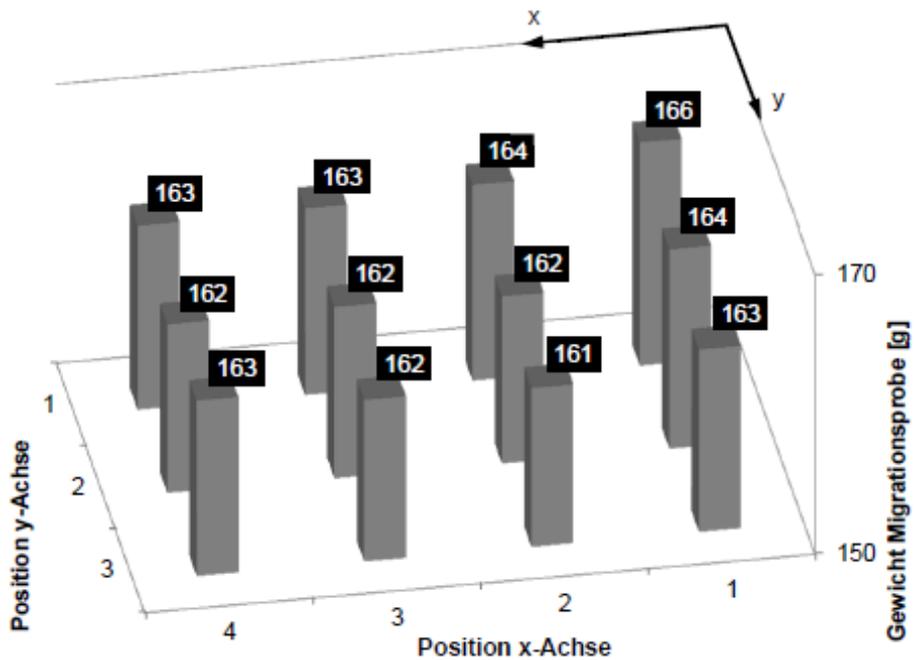
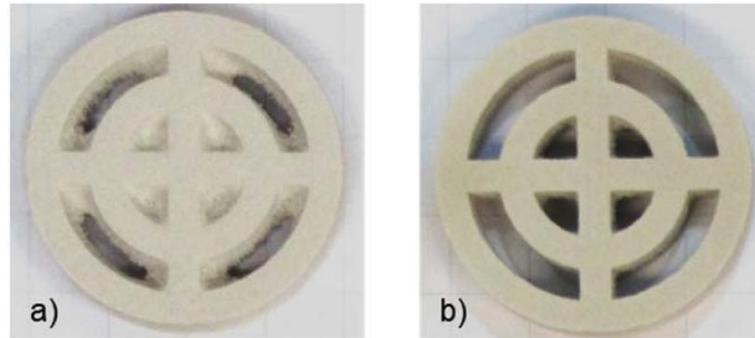


Diagramm 9: Gewichte der Diffusionsproben, die mit Einsatz der Heizlampe gedruckt wurden

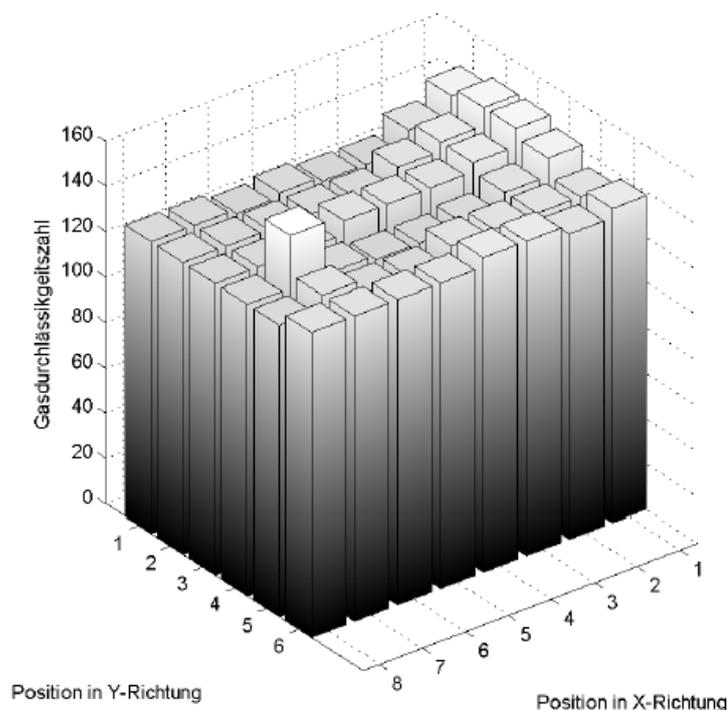
Es zeigt sich sehr deutlich, dass durch den Einsatz der Heizlampe die Gewichte der Diffusionsprüfkörper über alle Positionen im Baufeld hinweg stark abnehmen. Des Weiteren schwanken die Gewichte der Prüflinge, die aus einem Druckprozess ohne Lampe stammen, stärker. Die starken Anhaftungen an den Prüflingen die ohne Heizlampe gedruckt wurden, können neben dem Gewicht auch optisch bewertet werden, wie Abbildung 20 verdeutlicht.



**Abbildung 20:** Exemplarischer Vergleich einer Diffusionsprobe aus einem Prozess ohne Heizlampe (a) mit einer aus einem Prozess mit Heizlampe (b)

Es ist deutlich zu erkennen, dass ohne den Einsatz der Heizlampe eine starke Diffusion des Fluids in die Bauteilzwischenräume stattfindet. Diese führt zu starken Abweichungen in der Maßhaltigkeit des gedruckten Teils sowie zu ungünstigen Oberflächeneigenschaften. Mit den durchgeführten Untersuchungen konnte der positive Einfluss der Heizlampe auf das Qualitätsmerkmal Diffusion nachgewiesen werden.

Neben den Untersuchungen zu dem Einfluss der Heizlampe auf die Festigkeit, den Feuchtegehalt und die Diffusion der gedruckten Prüflinge wurden Prüfreihen zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeitszahl durchgeführt. Diagramm 10 zeigt die Gasdurchlässigkeitszahlen der Prüflinge in Abhängigkeit ihrer Lage in der Jobbox. Die Bestimmung erfolgte nach VDG Merkblatt P 41



**Diagramm 10:** Grafische Darstellung der Gasdurchlässigkeitsmessung nach VDG Merkblatt 41

Der Mittelwert der gesamten Messung liegt bei 133 Gasdurchlässigkeitseinheiten, mit einer Standardabweichung von 6.

Durch die Aufnahme des Ist-Zustands der Anlage am utg und die Korrelation von Prozessparametern und Prüfgrößen konnte bereits eine Vielzahl von Zusammenhängen herausgearbeitet werden. Somit konnte das AP 4 erfolgreich abgeschlossen werden. Die Variation dieser und weiterer Prozessparameter – mit optimierter Anlagentechnik – ist Inhalt des Nachfolgeprojekts unter dem DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2 – 2.

### 5.5 AP 5: Demonstrator

Ziel des Arbeitspakets 5 war die Demonstration der Gießbarkeit einer am Lehrstuhl utg gedruckten, anorganisch gebundenen Sandform. Diese Demonstration wurde anhand einer Form für den Abguss von normierten Zugstabrohlingen durchgeführt. Als Referenz hat die Firma Voxeljet die Form im Serien-Kaltharzverfahren mit organischen Bindemitteln bereitgestellt. Die Form für den Abguss des Demonstratorbauteils wurde am Lehrstuhl utg hergestellt. Beide Formen wurden aus der gleichen Hitze abgegossen. Beim Guss selbst wurden die freiwerdenden Emissionen (Qualm, Geruch) der beiden Formen dokumentiert. Abbildung 21 zeigt die beiden gegossenen Formen.

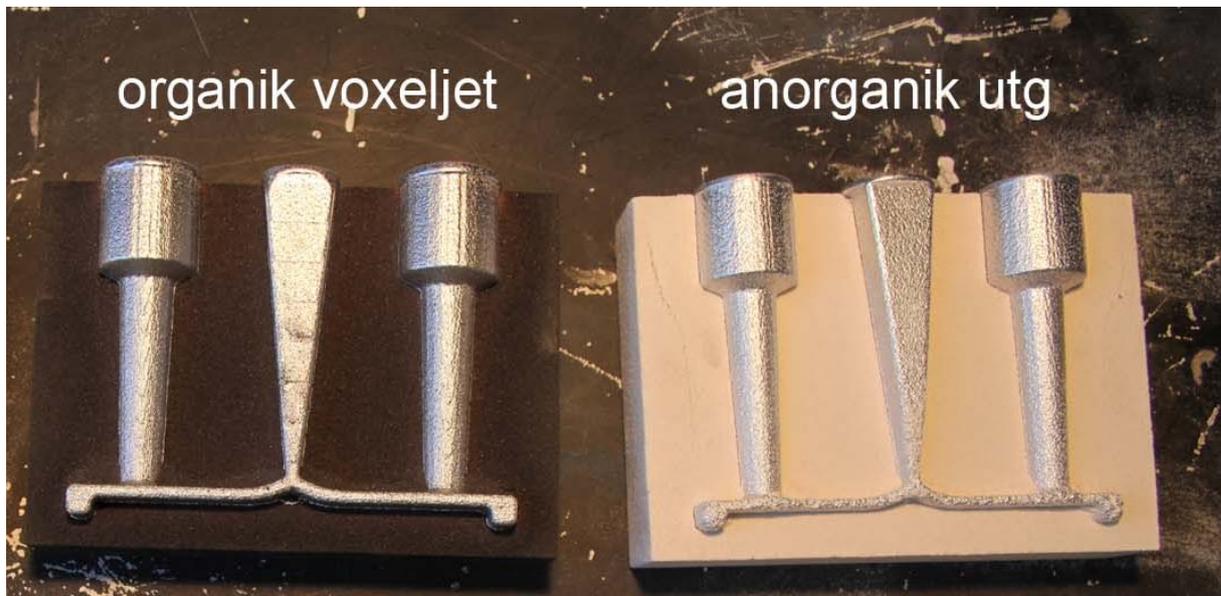


Abbildung 21: Vergleich des Demonstrator-Gussbauteils in 3D-gedruckten Formen aus dem Serien-Kaltharzsystem (links) und dem anorganischen System VX-AOB (rechts)

Ein optischer Vergleich der beiden Gussteile verdeutlichte die Qualitätseinbußen am Gussteil, welches mit dem anorganischen System gedruckt worden war. Dies ist unter anderem ein Ansatzpunkt des Nachfolgeprojekts (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2 – 2). Dennoch konnte durch diesen Versuch die Gießbarkeit eines Gussteils in einer anorganisch gebundenen RP-Form unter Beweis gestellt und somit das AP 5 erfolgreich abgeschlossen werden.

### 5.6 AP 6: Dokumentation

Die Dokumentation während des Projekts erfolge gemäß der DBU Richtlinien und wird mit dem vorliegenden Abschlussbericht abgeschlossen. Die Dokumentation der 2. Phase des Projekts (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2 – 2) knüpft nahtlos an diesen Abschlussbericht an.

## 6 Fazit

Der Einsatz von anorganischen Bindersystemen in einem Gießereibetrieb leistet unumstritten einen erheblichen Beitrag zum Umweltschutz. Während der gesamten Prozesskette von der Sandkernfertigung, über das Gießen, die Werkzeuginstandhaltung bis hin zur Abluftreinigung bringt die Umstellung auf anorganische Bindersysteme eine Reihe von Vorteilen für die Arbeitsbedingungen des Mitarbeiters und den Umweltschutz mit sich. Durch den Einsatz anorganischer Bindersysteme lassen sich die Zersetzungsprodukte beim Abguss um 98% reduzieren, was dem gießereitypischen Geruch und der damit verbundenen Arbeitsplatz- und Umweltbelastung entgegenwirkt [ROSE10]. Die nahezu vollständige Eliminierung dieser schädlichen Zersetzungsprodukte ist sehr deutlich direkt während dem Gießprozess zu beobachten.

Ein 3D-Druckverfahren, welches derartige anorganische Bindersysteme verarbeiten kann, trägt dazu bei, eine breitere Akzeptanz für diese umweltfreundlichen Systeme zu schaffen. Da das Verfahren keine kostenintensiven Werkzeuge benötigt, können mit geringen Einstiegskosten erste Gussteile mit anorganischen Formen und Kernen erzeugt werden. Somit ist anorganisches 3D-Drucken für Gießereien aller Größenordnungen attraktiv. Neben diesen Emissionsreduktionen beim Abguss kann auch die Herstellung von RP-Kernen und -Formen umweltgerechter gestaltet werden. Auch in der Produktion fallen beim konventionellen Kaltharzverfahren große Menge an flüchtigen und flüssigen Abfallkomponenten an. Diese müssen zum einen der Entsorgung zugeführt werden und gehen zum anderen als gesundheitsschädliche Dämpfe in die Atmosphäre über. Das auf Wasserglas und Wasser basierende anorganische Sand-Binder-System stellt hingegen kein Problem dar. Dabei können ebenso Energieaufwendungen für die Abluftreinigung eingespart werden. Im Gegensatz zum Kaltharzprozess kann hier ein echtes Recycling des Formstoffes für 3D-Drucker in Aussicht gestellt werden. Damit könnten wesentliche Mengen ansonsten nur noch deponierbaren Materials eingespart werden. Ebenso könnte ein derartiges Recyceln erhebliche Transportbewegungen vermeiden und somit zu weiteren Energieeinsparungen beitragen.

Die sukzessive Verbreitung der anorganischen Bindersysteme in deutschen Gießereien zeigt, dass sich die angestrebten ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Ziele in der Praxis umsetzen lassen. Bis jedoch die weit entwickelten und bewährten organischen Bindersysteme vollständig von anorganischen abgelöst werden können, ist noch erheblicher Entwicklungsaufwand – besonders im Bereich der angewandten Forschung – notwendig. Je früher im Produktentstehungsprozess die Eigenschaften anorganisch gebundener Sandformen und -kerne berücksichtigt werden können, desto früher und sicherer lässt sich ein Serienprozess auf diese umweltfreundliche Technologie umstellen.

Das im Sommer 2012 begonnene Kooperationsprojekt zwischen der Voxeljet technology GmbH und dem Lehrstuhl utg setzte an dieser Stelle an und leistete einen entscheidenden Beitrag zur Vervollständigung der Prozesskette „Anorganik“. In der aktuell laufenden 2. Phase des Projekts (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2 – 2) wird die Entwicklung des 3D-Druckens mit anorganischen Sand-Binder-Systemen weiter vorangetrieben. Bis Mitte 2015 läuft dieses Anschlussprojekt mit dem Ziel bereits in der Prototypenphase serienähnliche Formen und Kerne herstellen zu können. Des Weiteren leistet die angestrebte Verknüpfung von Formstoff- und Gussteileigenschaften einen entscheidenden Beitrag zur Akzeptanz dieses Verfahrens. Somit wird den Vorbehalten, die gegenüber einer Umstellung eines Gießereibetriebs auf diese umweltschonende Technologie bestehen, begegnet und die weitere Verbreitung anorganischer Bindersysteme in deutschen Gießereien gefördert.

## 7 Literaturverzeichnis

- [BOEH12] R. Boehm, A. Serghini:  
*Einsatz moderner, emissionsfreier anorganischer Bindersysteme für die Herstellung komplexer Stahlgussteile.*  
Tagungsband – Große Gießereitechnische Tagung, Salzburg (2012)
- [EDER04] I. Ederer:  
*Werkzeuglose Formherstellung mittels 3D-Drucktechnologie.*  
Giesserei-Praxis (2004) Nr. 11
- [ESSB10] S. Eßbauer:  
*World's first emission-free foundry.*  
Casting Plant & Technologies (2/2010)
- [GREF11] C. Grefhorst, N. Richardson, O. Podobed:  
*Herausforderungen bei der Umstellung auf eine anorganische Form- und Kernherstellung.*  
GIESSEREI 98 (12/2011)
- [GROE12] P.M. Gröning:  
*Formstoffe (48. Folge)*  
GIESSEREI 99 (02/2012)
- [PABE09] T. Pabel, C. Knießl, J. Brotzki, J. Müller:  
*Anorganisches Bindersystem.*  
GIESSEREI-PRAXIS (2009) Nr. 11
- [POLZ07] H. Polzin:  
*GIFA 2007 – Übersicht chemisch härtende Formstoffe.*  
GIESSEREI-PRAXIS (09/2007)
- [ROSE10] B. Rose:  
*Leichtmetallguss mit anorganisch gebundenen Kernsand. Weniger Belastungen für Mensch und Umwelt.*  
VMBG Mitteilungen (2010) Nr. 4
- [TILC03] W. Tilch, H. Polzin:  
*GIFA 2003 – Formstoffe, Formverfahren und Maschinen zur Form- und Kernherstellung, Formstoffaufbereitung und Regenerierung*  
GIESSEREI-PRAXIS (10/2003)

- [WEIS11] E. Weissenbeck, T. Kautz, J. Brotzki, J. Müller:  
*Zylinderkopffertigung der Zukunft – Ökologie, Ökonomie und Werkstoffoptimierung im Einklang.*  
MTZ 72. Jahrgang (06/2011)
- [WOLF09] H. Wolff:  
*Form- und Kernherstellung mit chemisch gebundenen Formstoffen.*  
GIESSEREI 96 (05/2009)