



Abschlussbericht zu dem Forschungsprojekt

Rapid Prototyping von Sandformen mit anorganischen Bindersystemen (2. Phase)

von

Dr.-Ing. Daniel Günther
(voxeljet AG)

und

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

Friedberg / Garching 24.09.2015

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

(DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2/02)

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch

Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Az	30340 - 21/2/02	Referat	21/2	Fördersumme	233.334 €
----	-----------------	---------	------	-------------	------------------

Antragstitel Rapid Prototyping von Sandformen mit anorganischen Bindersystemen (Phase 2)

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24 Monate	17.06.2013	16.06.2015	2/2

Zwischenberichte: alle 6 Monate Kurzbericht

Bewilligungsempfänger	voxeljet AG 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

Kooperationspartner Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg)
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
Walther-Meißner-Straße 4
85748 Garching

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens ist die Einwicklung eines robusten Rapid-Prototyping Prozesses, mit dem sich prozesssicher anorganisch gebundene Sandformen und -kerne herstellen lassen. Diese müssen sich in ihren Eigenschaften an Teilen messen lassen, welche in dem Serienprozess (Kernschießen) hergestellt wurden und den hohen Anforderungen der Serienteile entsprechen. Diese Anforderungen beziehen sich dabei nicht nur auf den Formstoff. Zusätzlich soll anhand von gegossenen Versuchsteilen, das große Potential dieser Technologie am Endprodukt Gussteil aufgezeigt werden. Nach aktuellem Stand der Technik ist eine Herstellung von Prototypenformen lediglich in einem organischen Sand-Binder-System darstellbar. Die mangelnde Übertragbarkeit der Form- und Gussteileigenschaften zwischen dem organischen Prototypenverfahren und dem anorganischen Serienverfahren reißt eine gravierende Lücke im Produktentstehungsprozess eines Gussteils. So müssen Gießereien aktuell eine Umstellung ihrer Produktion auf umweltfreundliche, anorganische Sand-Binder-Systeme im laufenden Serienprozess durchführen. Diese Umstellung birgt große wirtschaftliche und technische Risiken, da eine vorherige Absicherung der „Anorganik“ in der Prototypenphase eines Gussteils nach dem Stand der Technik aktuell noch nicht möglich ist. Hier greift das beantragte Forschungsvorhaben ein und setzt sich die Entwicklung eines robusten Rapid-Prototyping Prozesses, mit dem sich anorganisch gebundene Sandformen und -kerne herstellen lassen, zum Ziel. Der Grundstein, dieses übergeordnete Ziel zu erreichen, wurde in der ersten Phase des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsvorhabens 30340 - 21/2/01 gelegt. Das wissenschaftlich-technische Lösungskonzept der zweiten Phase 30340 - 21/2/02 setzt sich aus 13 Arbeitspaketen zusammen, welche im Laufe der 24-monatigen Projektlaufzeit strukturiert und zügig abgearbeitet werden. Die Ergebnisse der 13 Arbeitspakete werden in dem vorliegenden Abschlussbericht von dem jeweils hauptverantwortlichen Projektpartner dargelegt.

Ergebnisse:

Eine umfangreiche Prozessüberwachung sowie eine größtmögliche Standardisierung von Prozess- und Prüfabläufen sind unabdingbar für die Reproduzierbarkeit der Teileigenschaften. Dennoch lassen sich prozess- und prüfbedingte Unsicherheiten nicht vollständig vermeiden. Die Prozesstemperatur, die während der Herstellung von Formen und Kernen im 3-D-Drucker herrscht, wird maßgeblich durch den Energieeintrag und die Zykluszeit bestimmt. Die Binderkonzentration und der Fluideintrag bestimmen vornehmlich die Dichte der gedruckten Teile. Der Energieeintrag und die Zykluszeit haben einen signifikanten, jedoch untergeordneten Einfluss. Die Bestimmung der Permeabilität ist mit verhältnismäßig großer Unsicherheit behaftet, deren Ursache hauptsächlich in dem verwendeten Prüfverfahren zu suchen ist. Dennoch zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Permeabilität von den Faktoren Binderkonzentration und Fluideintrag. Auf die Festigkeit nehmen die meisten der untersuchten Faktoren Einfluss. Der

Fluideintrag ist hier der dominierende Faktor, da er für die Aktivierung des Sand-Binder-Systems verantwortlich ist. Ebenfalls müssen die Binderkonzentration und der Energieeintrag berücksichtigt werden. Bei der Erhöhung des Energieeintrags muss mit dem Auftreten von Curl gerechnet werden. Sämtliche andere Faktoren zeigen auf die Ausprägung von Curl keinen Einfluss. Die Fluidmigration wird signifikant von der Binderkonzentration, dem Fluideintrag und dem Energieeintrag beeinflusst. Der Abrieb zeigt lediglich von dem Fluideintrag eine signifikante Abhängigkeit. Hier ist unterhalb eines kritischen Fluideintrags eine exponentielle Zunahme des Abriebs zu beobachten. Es war nicht möglich den HSQ Sand, als großer Kostenfaktor des Sandsystems, zu ersetzen, ohne an Qualität und Festigkeit der Bauteile zu verlieren. Auch eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit erbrachte keine weiteren Verbesserungen. Es zeigte sich, dass durch das standardmäßige Entgasen des Binders die Prozessstabilität als auch die Lebensdauer der Druckmodule verbessert werden konnte. In Lagerversuchen im Pulverbett über die Zeit konnte eine optimale Entpackzeit von 4-5 h nach dem Drucken ermittelt werden. Nach dieser Zeit sind die Festigkeiten der Bauteile unabhängig von der Bauteillage ausreichend. Durch einen nachgeschalteten Temperierungsschritt kann die Festigkeit noch weiter erhöht und die Feuchtigkeit auf einen Wert von 0,2% - 0,3% eingestellt werden. Bauteile mit niedrigerer Restfeuchte weisen nur noch eine geringe bis gar keine Festigkeit mehr auf, bei höheren Werten treten vermehrt Probleme beim Guss auf. Auch wenn vor allem aufgrund des hohen Preises des Materialsystems ein Recycling des nicht gebundenen Sandes von großem Interesse ist, musste festgestellt werden, dass das ungebundene Material, im Speziellen das sprühgetrockneten Wasserglases, während dem Prozess thermisch geschädigt wird. Die Festigkeitsentwicklung der Bauteile, die auch nur aus einem Bruchteil wiederverwendeten Sandes bestehen, bleibt deutlich hinter den Anforderungen zurück. Außerdem sind die Teile qualitativ merklich schlechter und nicht für den Guss geeignet. Gießversuche mit Gusseisen zeigen eine grundsätzliche Einsatzfähigkeit der anorganisch gedruckten Kerne. Bei der Handhabung ist im Vergleich mit organisch gebundenen Kerne größere Sorgfalt anzuwenden. Die Versuchsteile zeigten Gussfehler in Form von Penetration und Restsand. Gießversuche mit Aluminium zeigten ebenfalls eine grundsätzliche Einsatzfähigkeit der anorganisch gedruckten Kerne. Sie konnten die manuelle und maschinelle Handhabung unbeschadet überstehen. Austretendes Kerngas verursachte Gasporosität in den Versuchsteilen. Ebenfalls kam es zu den Gussfehlern Heißverzug und Restsand.

Veröffentlichungen:

- Ramakrishnan, R.; Griebel, B.; Volk, W.; Günther, D.; Günther, J.: Prozessentwicklung für das 3-D-Drucken mit anorganischen Formstoffsystemen. GIESSEREI 101 (2014), 46 - 55.
- Ramakrishnan, R.; Griebel, B.; Volk, W.; Günther, D.; Günther, J.: Prozessentwicklung für das 3-D-Drucken mit anorganischen Formstoffsystemen. GIESSEREI RUNDSCHAU 61 (2014), 152 - 161. (Nachdruck).
- Ramakrishnan, R.; Griebel, B.; Volk, W.; Günther, D.; Günther, J.: 3D Printing of Inorganic Sand Moulds for Casting Applications. Advanced Materials Research 1018 (2014), 441 - 449.
- Ramakrishnan, R.; Volk, W.: Prozessentwicklung für das 3D-Drucken mit anorganischen Formstoffsystemen. Barbaratagung, Friedberg (Hessen), 22.11.2013.
- Ramakrishnan, R.; Volk, W.: Prozessentwicklung für das 3D-Drucken mit anorganischen Formstoffsystemen. Barbaratagung, Garching bei München, 28.11.2013.
- Volk, W.; Ramakrishnan, R.; Griebel, B.: 3D-Drucken und Kernschießen mit anorganischen Formstoffsystemen. Österreichische Gießereitagung, Bad Ischl, 25.04.2014
- Volk, W.; Ramakrishnan, R.; Griebel, B.: 3D-Drucken und Kernschießen mit anorganischen Formstoffsystemen: Aktuelle Forschungsergebnisse und zukünftige Forschungsvorhaben am utg. Deutscher Gießereitag, Hamburg, 16.05.2014.
- Ramakrishnan, R.; Griebel, B.; Volk, W.; Günther, D.; Günther, J.: 3D Printing of Inorganic Sand Moulds for Casting Applications. WGP Kongress, Erlangen, 10.09.2014.
- Griebel, B.; Ramakrishnan, R.; Volk, W.: Festigkeitsprüfung von generativ hergestellten Formstoffen für die Gießereiindustrie. testXpo, Ulm, 16.10.2014
- Ramakrishnan, R.; Volk, W.: 3D Printing of Sand Molds and Cores with Eco-Friendly Binders for Casting Applications. RAPID, Long Beach, California, USA, 19.05.2015.
- Ramakrishnan, R.: 3-D-Drucken mit einem anorganischen Formstoffsystem. Dissertation, Technische Universität München, Veröffentlichung vsl. 2016.

Fazit:

Durch das geförderte Forschungsvorhaben konnten die signifikanten Einflussparameter des 3-D-Druckprozesses mit einem anorganischen Bindersystem verstanden und optimiert werden. Ihre Auswirkungen auf gussrelevante Qualitätsmerkmale konnten umfassend beschrieben werden. Ebenfalls konnte das Materialsystem verbessert und geeignete Nachbehandlungsverfahren identifiziert werden. Die durchgeführten Gießversuche offenbarten die grundsätzliche Eignung des Formstoffsystems für den Aluminium- und Eisenguss, wobei noch weiterführende Untersuchungen zur Optimierung des Heißverzugs und der Entkernbarkeit notwendig sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnis von Abbildungen	4
2	Verzeichnis von Diagrammen.....	6
3	Verzeichnis von Tabellen.....	6
4	Zusammenfassung	7
5	Einleitung.....	8
5.1	Rapid Prototyping Verfahren zur Form- und Kernherstellung im Metallguss.....	8
5.2	Anorganische Bindersysteme zur Form- und Kernherstellung im Metallguss	9
5.3	Zielsetzung	10
6	Hauptteil	12
6.1	AP 1: Integration intelligenter Baufeldheizung (utg).....	12
6.2	AP 2: Druckkopferweiterung (Voxeljet)	15
6.3	AP 3: Aufbau erweiterter Sandprüfmethodik (utg)	16
6.4	AP 4: Weiterentwicklung Sand-Binder-System (Voxeljet).....	23
6.5	AP 5: Aufnahme Ist-Zustand nach Umbaumaßnahmen (utg).....	28
6.6	AP 6: Weiterführung Parametervariation mit erweiterten Sandprüfmethoden (utg)	34
6.7	AP 7: Postprocessing (Voxeljet).....	45
6.8	AP 8: Recycling (Voxeljet).....	48
6.9	AP 9: Entwicklung Testgeometrie Gussteil (utg).....	49
6.10	AP 10: Definition Prüfmethodik Gussteile (utg).....	49
6.11	AP 11: Abgüsse Testgeometrie und Serienteile in Aluminium und Gusseisen (utg)	49
6.12	AP 12: Charakterisierung Gussteile (utg).....	51
6.13	AP 13: Dokumentation (utg / Voxeljet)	53
7	Fazit.....	54
8	Literaturverzeichnis	57
9	Anhang	59

1 Verzeichnis von Abbildungen

Abbildung 1:	Prozessschritte bei dem 3D-Druckprozess.	8
Abbildung 2:	Übergeordnetes Projektziel ist die Einwicklung eines Rapid-Prototyping Prozesses, welcher die Lücke im Prozess „Anorganik“ schließt.....	11
Abbildung 3:	Schichtzyklus: Beschichten (a), Bedrucken (b) und Heizen (c). A = Beschichter, B = Materialwalze, C = Baufeld, D = Druckkopf, E = x-Achse, F = IR-Strahler.....	13
Abbildung 4:	Screenshot des LabVIEW-Programms. A = Thermoelementanzeige, B = Reiterauswahl, C = Einstellungen Positionssystem, D = Warte- und Vorglühparameter, E = Visualisierung des Strahlerprofils, F = Trigger, G = Konfiguration des Strahlerprofils.	14
Abbildung 5:	Geöffneter Druckkopf (a) und Funktionsschema (b): A = Elektrische Anschlüsse, B = Druckfluidversorgung, C = Unterdruckversorgung, D = Flow-Purge-Ventil, E = Fluidtank, F = Füllstandsensoren, G = Verteilerventile, H = Steuerplatine, I = Druckmodule.....	15
Abbildung 6:	Schematische Draufsicht (a) und Photographie (b) der modifizierten VX500 Versuchsanlage am Lehrstuhl utg: A = Thermoelemente zur Messung der Baufeldtemperatur, B = Reinigungsstation, C = Capping, D = IR-Strahler, E = Druckkopf (mit Thermoelementen), F = Beschichter, G = Materialfang, H = Schnecke, I = x-Achse, J = y-Achse, K = Anlagenrechner, L = Messrechner, M = Wärmebildkamera.....	16
Abbildung 7:	Anordnung der Prüfkörper in einer schematischen Draufsicht des Baufelds (a) und Konstruktionszeichnungen des Ringprüfkörpers (b) und des Scheibenprüfkörpers (c)	17
Abbildung 8:	Im Zustand nach dem Druck-Prozess hat der Prüfling ein undefiniertes Volumen, welches durch Abtragen in einer Stahlschablone (a) auf das Nennmaß gebracht wird. Die Nennmaßkontrolle (b) erfolgt mithilfe eines Messschiebers.....	18
Abbildung 9:	Fotographie und Funktionsschaubild des Gasdurchlässigkeitsprüfgeräts Typ LPiR-3e. A = Hauptschalter, B = Bedienpanel, C = Handpumpe, D = Dichtmanschette, E = Obere Positionierhülse, F = Scheibenprüfkörper, G = Untere Positionierhülse, H = Düse.	18
Abbildung 10:	Universalprüfmaschine Z020 (a) mit eingebauter Scheibentest-Aufnahme (b) sowie einer schematischen Darstellung der Prüfsituation (c).....	20
Abbildung 11:	Charakteristisches Bruchbild eines Scheibenprüfkörpers von der Auflagerseite (a) und der Lastseite (b).....	20
Abbildung 12:	Unterschiedliche Ausprägungen von Curl am Beispiel von fünf repräsentativen Ringprüfkörpern. Kein Curl (a), minimale Verschiebung (b), leichte Verschiebung (c), starke Verschiebung (d) und zerstörte Ringprobe (e).	21
Abbildung 13:	Ringprüfkörper vor und nach dem Finishing mit Druckluft. Bei geringen Auftreten von Fluidmigration (a) ist das Material in den Stegzwischenräumen ungebunden und kann ausgeblasen werden (b). Bei starker Fluidmigration (c) ist das Material gebunden und kann nicht durch das Finishing mit Druckluft entfernt werden (d).	22
Abbildung 14:	Reale Ausführung des Abriebprüfgeräts in der Draufsicht (a) und Schema der Funktionsweise in der Seitenansicht (b). A = Referenzgewicht, B = Halterung, C = Abriebband, D = Antrieb, E = Zahnräder, F = Ringprüfkörper.	23
Abbildung 15:	links oben: schematische Darstellung eines Moduls, Ablagerungen im Druckmodul, korrodierte Bereiche.	27

Abbildung 16: Entgasen des Binders in einer Vakuumkammer	27
Abbildung 17: REM Aufnahmen der Bruchfläche eines mit Referenzeinstellungen hergestellten Scheibenprüfkörpers (a) und Detail einer Sandkornbruchfläche und einer gebrochenen Binderbrücke (b)	33
Abbildung 18: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern mit 5% (a) und (b) sowie mit 15% (c) und (d) Binderkonzentration. Die Markierungen A, B und C in Ausschnitt (b) geben die Positionen der EDX Analysen wieder.	37
Abbildung 19: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern mit 5% (a) und (b) sowie 15% (c) und (d) Fluideintrag	40
Abbildung 20: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern mit 0 J (a) und (b) sowie 11,205 kJ (c) und (d) Energieeintrag	43
Abbildung 22: Wasserglas vor (links) und nach thermischer Schädigung (rechts)	48
Abbildung 23: Gedruckter, anorganisch gebundener Kern in der Gussform vor dem Zulegen der Form (a). Durch die Schlichte nimmt der Kern eine gelbliche Farbe an. Gussteil vor dem Putzen und Entkernen (b).....	50
Abbildung 24: Gedruckter, anorganisch gebundener Versuchskern (a) und Einfüllen der Aluminiumschmelze in die Kokille während des Gießversuchs (b).....	50
Abbildung 25: Übersicht des Gusseisenversuchsteils mit gedrucktem Anorganikkern (a) und geschossenem Cold-Box-Kern (b)	51
Abbildung 26: Detailaufnahme 1 des Gussteilinneren. Bei der Verwendung des gedruckten Anorganikkerns (a) kam es zu Penetration an der Gussteiloberfläche. Bei Verwendung des Cold-Box-Kerns ist die Gussteiloberfläche i.O.	51
Abbildung 27: Detailaufnahme 2 des Gussteilinneren. Bei der Verwendung des gedruckten Anorganikkerns (a) verbleibt Reststand nach dem Entkernen im Gussteil. Bei Verwendung des Cold-Box-Kerns kann das Gussteil vollständig entkernt werden. ...	52
Abbildung 28: Ausschnitt einer CT-Analyse eines Versuchsteils, welches mit einem anorganisch gedruckten Kern Hergestellt wurde. Das Versuchsteil zeigt die Gussfehler Gasporosität. Heißverzug und Restsand.....	52
Abbildung 29: Schaltplan der thermischen Prozesssteuerung- und Überwachung	59
Abbildung 30: Umrechnungstabelle Gasdurchlässigkeitsprüfgerät.....	60

2 Verzeichnis von Diagrammen

Diagramm 1:	Erwärmung von Scheibenprüfkörpern an fünf verschiedenen y-Positionen ohne positions- und schichtzahlabhängige Leistungssteuerung (a). Leistungsfaktor über der y-Position (b) und über der Schichtzahl (c).....	28
Diagramm 2:	Erwärmung von Scheibenprüfkörpern an fünf verschiedenen y-Positionen mit positions- und schichtzahlabhängiger Leistungssteuerung (a). Leistungsfaktor über der y-Position (b) und über der Schichtzahl (c).....	29
Diagramm 3:	Mittlere Erwärmung der Prüfkörper ohne (a) und mit (b) Leistungssteuerung.....	29
Diagramm 4:	Festigkeitsverteilung eines nicht-temperaturkompensierten (a) und eines temperaturkompensierten (b) Jobs.....	30
Diagramm 5:	Festigkeitsverteilung von einem Job mit einem instabil (a) und einem stabil (b) arbeitenden Druckkopf.....	31
Diagramm 6:	Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) der Scheibenprüfkörper für sieben Referenzjobs.....	32
Diagramm 7:	Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) der Ringprüfkörper für sieben Referenzjobs.....	33
Diagramm 8:	Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit der Binderkonzentration.....	35
Diagramm 9:	Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit der Binderkonzentration.....	36
Diagramm 10:	Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit des Fluideintrags.....	38
Diagramm 11:	Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit des Fluideintrags.....	39
Diagramm 12:	Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit des Energieeintrags.....	41
Diagramm 13:	Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit des Energieeintrags.....	42
Diagramm 14:	Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit der Zykluszeit.....	44
Diagramm 15:	Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit der Zykluszeit.....	45

3 Verzeichnis von Tabellen

Tabelle 1:	Einfluss des Wasserglasanteils auf die Festigkeit und Dichte der Bauteile.....	24
Tabelle 2:	Festigkeiten in Abhängigkeit von der Sandart, Anorgitgehalt und Eintrag.....	25
Tabelle 3:	Eintragsreihe mit dem homogen gemischten Sandsystem.....	26
Tabelle 4:	Festigkeitswerte im rohen Zustand als auch nach erfolgter Wärmebehandlung in Abhängigkeit von der Zeit.....	46
Tabelle 5:	Restfeuchtegehalt in Abhängigkeit der Wandstärke und der Trocknungszeit.....	48

4 Zusammenfassung

Die Förderung der ersten Phase dieses Forschungsvorhabens durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2/01) setzte 2012 den Grundstein für die erfolgreiche Zusammenarbeit der voxeljet AG (ehemals voxeljet technology GmbH) mit dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) der Technischen Universität München auf dem Gebiet des 3-D-Druckens mit anorganischen Sand-Binder-Systemen. In diesem Projekt wurde ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht, anorganisch gebundene Sandformen in einem 3D-Druckverfahren herzustellen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in dem entsprechenden Abschlussbericht (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2/01) dargelegt.

Aufbauend auf die erfolgreiche und zielführende Zusammenarbeit des ersten, einjährigen Projekts wurde im Juni 2013 die zweite Projektphase (DBU-Aktenzeichen: 30340 - 21/2/02) ohne Unterbrechung fortgeführt. 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 reale Gussteile hergestellt und untersucht werden, stellt die industrielle Relevanz sicher.

Auf Basis der Erkenntnisse der ersten Projektphase wurden an der Versuchsanlage am Lehrstuhl *utg* umfangreiche Modifikationen vorgenommen. Mit Hilfe dieser Modifikationen konnten eine Prozessüberwachung und -steuerung realisiert werden, die die Durchführung reproduzierbarer Versuchsreihen im gewünschten Prozessfenster ermöglichten. Hiermit konnte eine Referenzversuchsreihe (Referenzjob) definiert werden, der im Laufe des Projekts stets als Kontrolle diente. Der Lehrstuhl *utg* entwickelte und erprobte eine Reihe verschiedener Formstoffprüfmethoden, die auf besonders auf die Bewertung von additiv hergestellten Sandformen ausgelegt sind. Mithilfe dieser Prüfmethoden wurde am Lehrstuhl *utg* eine umfangreiche Parameterstudie durchgeführt, in der die Zusammenhänge zwischen den wichtigsten Prozesseingangsgrößen (Faktoren) und Ausgangsgrößen (Hauptergebnissen) quantifiziert wurden. Parallel dazu optimierte die voxeljet AG das Sand-Binder-System hinsichtlich gussrelevanter Formstoffeigenschaften. In besonderem Fokus standen das für die Umweltverträglichkeit des Verfahrens bedeutende Postprocessing und die Recyclingfähigkeit. Die praktische Umsetzbarkeit wurde in einer Reihe von Gießversuchen dargelegt. Hierbei wurden im Serienbetrieb von Gießereien sowohl Gießversuche in Aluminium als auch in Gusseisen durchgeführt. Die hergestellten Gussteile zeigten überwiegend positive Ergebnisse, konnten jedoch noch verbleibende Schwachstellen des Verfahrens aufdecken.

Die Veröffentlichung und Verbreitung der Projektergebnisse erfolgte in insgesamt zwei internationalen und einem nationalen Fachzeitschriftenbeitrag. Vorträge wurden auf fünf nationalen sowie zwei internationalen Veranstaltungen gehalten. Die gewonnenen Ergebnisse des Lehrstuhls *utg* stellen die Basis für die Dissertation von Herrn Robert Ramakrishnan dar. Diese Dissertation mit dem Titel „3-D-Drucken mit einem anorganischen Formstoffsystem“ wird voraussichtlich im ersten Halbjahr 2016 im MediaTUM Portal der Technischen Universität München veröffentlicht werden.

Mit diesem Forschungsvorhaben wird ein substantieller Beitrag zu der weiteren Verbreitung und Akzeptanz der umweltschonenden und nachhaltigen Technologie „Anorganik“ in deutschen Gießereien geleistet.

5 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.

5.1 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.

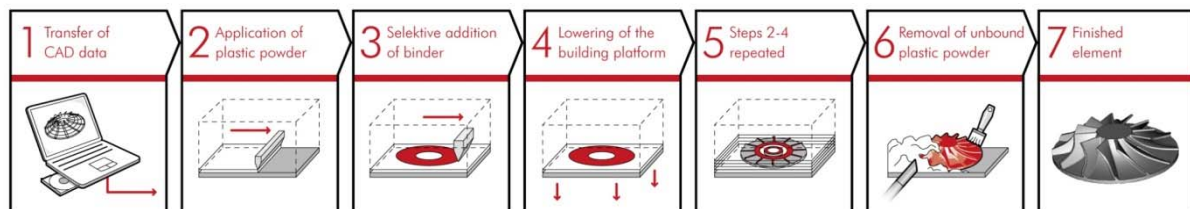


Abbildung 1: Prozessschritte bei dem 3D-Druckprozess.

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.

5.2 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 CO₂-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.

5.3 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel sowohl der ersten als auch der zweiten Projektphase war die Einwicklung eines robusten Rapid-Prototyping Prozesses, mit dem sich prozesssicher anorganisch gebundene Sandformen und -kerne herstellen lassen. Diese müssen sich in ihren Eigenschaften an Teilen messen lassen, welche in dem Serienprozess (Kernschießen) hergestellt wurden und den hohen Anforderungen der Serienteile entsprechen. Diese Anforderungen beziehen sich dabei nicht nur auf den Formstoff. Zusätzlich soll anhand von gegossenen Versuchsteilen, das große Potential dieser Technologie am Endprodukt Gussteil aufgezeigt werden. Nach aktuellem Stand der Technik ist eine Herstellung von Prototypenformen lediglich in einem organischen Sand-Binder-System darstellbar. Die mangelnde Übertragbarkeit der Form- und Gussteileigenschaften zwischen dem organischen Prototypenverfahren und dem anorganischen Serienverfahren reißt eine gravierende Lücke im Produktentstehungsprozess eines Gussteils. So müssen Gießereien aktuell eine Umstellung ihrer Produktion auf umweltfreundliche, anorganische Sand-Binder-Systeme im laufenden Serienprozess durchführen. Diese Umstellung birgt große wirtschaftliche und technische Risiken, da eine vorherige Absicherung der „Anorganik“ in der Prototypenphase eines Gussteils nach dem Stand der Technik aktuell noch nicht möglich ist. Hier greift das vorliegende Forschungsvorhaben ein und setzt sich die Entwicklung eines robusten Rapid-Prototyping Prozesses, mit dem sich anorganisch gebundene Sandformen und -kerne herstellen lassen, zum Ziel. Abbildung 2 veranschaulicht die beschriebene Lücke im Prozess „Anorganik“, sowie die Zielsetzung des Forschungsprojekts.

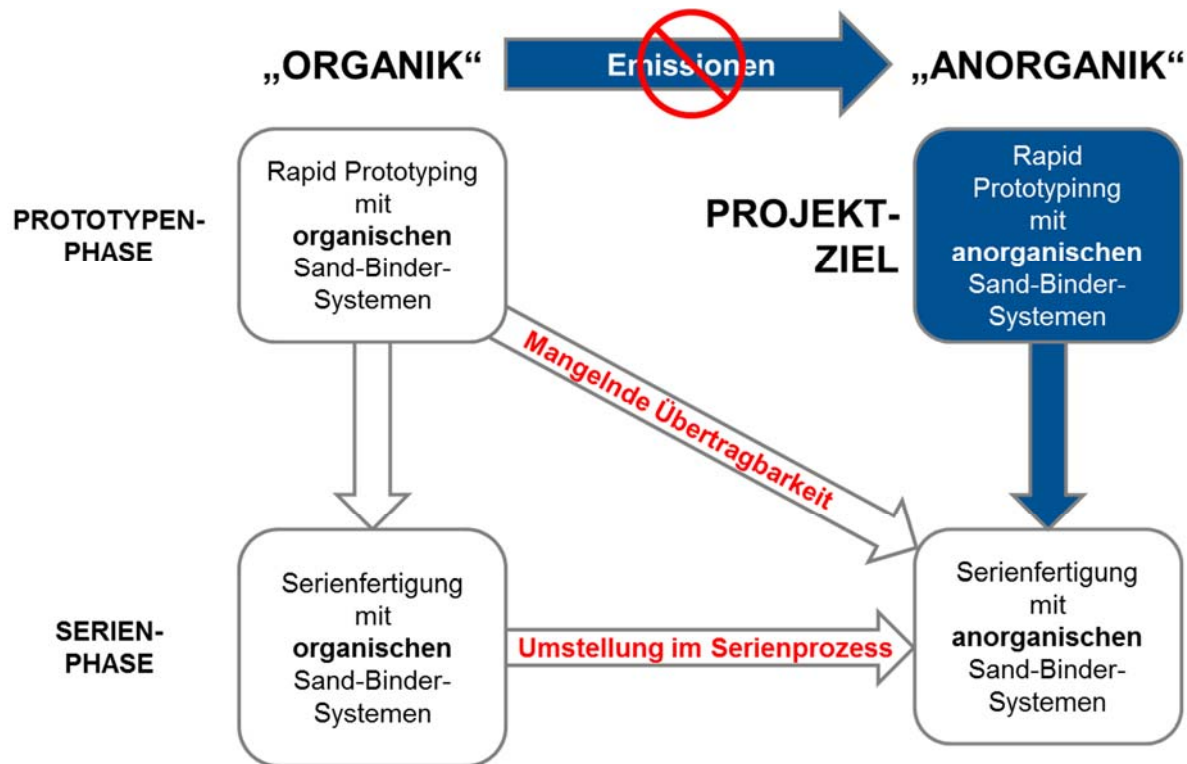


Abbildung 2: Übergeordnetes Projektziel ist die Einwicklung eines Rapid-Prototyping Prozesses, welcher die Lücke im Prozess „Anorganik“ schließt

Die Entwicklung eines anorganischen RP-Prozesses schafft die Basis für eine Substitution der umwelt- und gesundheitsschädlichen organischen Bindemittel in den Prototypen und Kleinserienbereichen der Gießereien. Des Weiteren leistet das Verfahren einen großen Beitrag zu der weiteren Verbreitung der anorganisch gebundenen Kernsande in Großseriengießereien, da sie Prototypen und Serienteile gleichermaßen aus einem umweltfreundlichen anorganischen Sand-Binder-System darstellen können.

Der Grundstein, dieses übergeordnete Ziel zu erreichen wurde in der ersten Projektphase (06/2012 – 05/2013) gelegt. In dem Projektantrag zum vorliegenden Nachfolgeprojekt, welches in einem Zeitraum von 24 Monaten bearbeitet wurde, wurden folgende Ziele definiert:

- Ziel 1: Verbesserte Prozesssteuerung durch Anpassung der Druck- und Heizsysteme auf Basis der im aktuell laufenden Projekt gewonnenen Ergebnisse
- Ziel 2: Erweiterung der Prüfmethodik und Weiterführung der Parametervariation zur verbesserten Charakterisierung der Sandformen und -kerne
- Ziel 3: Optimierung der Chemie und der Zusammensetzung des Sand-Binder-Systems
- Ziel 4: Entwicklung eines definierten Nachbehandlungsverfahrens (Postprocessing) zur Verbesserung der Form- und Kerneigenschaften
- Ziel 5: Untersuchung des Materialkreislaufs zur Wiederverwendbarkeit des unbedruckten Sandes
- Ziel 6: Charakterisierung von Gussteileigenschaften zur Bewertung des 3D-Druckverfahrens im Vergleich zum Serienverfahren (Kernschießen)

6 Hauptteil

Der Forschungsantrag für das vorliegende Projekt (Phase 2) wurde von der DBU am 16.06.2013 positiv bewertet. Die Laufzeit betrug 24 Monate ab dem 16.06.2013. Das Projekt gliederte sich in die folgenden Arbeitspakete:

Block 1: Anlage

- AP 1: Integration intelligenter Baufeldheizung (utg)
- AP 2: Druckkopfweiterung (Voxeljet)

Block 2: Formstoff

- AP 3: Aufbau erweiterter Sandprüfmethodik (utg)
- AP 4: Weiterentwicklung Sand-Binder-System (Voxeljet)
- AP 5: Aufnahme Ist-Zustand nach Umbaumaßnahmen (utg)
- AP 6: Weiterführung Parametervariation mit erweiterten Sandprüfmethoden (utg)
- AP 7: Postprocessing (Voxeljet)
- AP 8: Recycling (Voxeljet)

Block 3: Gussteil

- AP 9: Entwicklung Testgeometrie Gussteil (utg)
- AP 10: Definition Prüfmethodik Gussteile (utg)
- AP 11: Abgüsse Testgeometrie und Serienteile in Aluminium und Gusseisen (utg)
- AP 12: Charakterisierung Gussteile (utg)
- AP 13: Dokumentation (utg / Voxeljet)

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

6.1 AP 1: Integration intelligenter Baufeldheizung (utg)

In der standardmäßigen Anlagenausführung ist das 3-D-Drucksystem VX500 nicht mit einem Heizsystem ausgestattet. Um die in Abschnitt 5.1 beschriebene Kinetik der zweistufigen Binderreaktion thermisch beeinflussen zu können, bedarf es einer Wärmequelle innerhalb der Prozesskammer. Diese wurde in der Versuchsanlage in Form eines schnellen, mittelwelligen Zwillingsrohr-IR-Strahlers vom Typ 23X11 der Heraeus Nobellight GmbH, Kleinostheim, realisiert. Der Strahler ist an der x-Achse der Anlage parallel zur Baufeldoberfläche montiert und kann gemeinsam mit dieser in y-Richtung über das Baufeld bewegt werden. Ein steuerbarer Leistungssteller vom Typ HERATRON CB 1x15 der Heraeus Nobellight GmbH versorgt den IR-Strahler mit der designierten Heizleistung. Die Ausgangsleistung wird über ein 0 - 10 V Steuersignal vorgegeben. Die Eingabe der Leistungsdaten erfolgt über ein für diesen Anwendungszweck eigens entwickeltes Programm, welches nachfolgend beschrieben wird.

Das Heizen des Baufelds erfolgt in jedem Schichtzyklus nach dem Bedrucken und vor dem Beschichten. Damit setzt sich ein Zyklus aus den Schritten Beschichten, Drucken, Warten und Heizen zusammen. Die Wartezeit beträgt standardmäßig drei Sekunden um die Ansprechzeit des IR-Strahlers auszugleichen. Da der Strahler mithilfe der x-Achse über das Baufeld bewegt wird, wird der Energieeintrag in das SBS neben der Strahlerleistung auch von der Überfahrgeschwindigkeit bestimmt.

Diese wurde standardmäßig auf den Wert von 0,05 m/s festgesetzt. Variationen des Energieeintrags werden demzufolge ausschließlich über eine Anpassung der Strahlerleistung vorgenommen. Abbildung 3 zeigt die Schritte innerhalb eines Schichtzyklus.

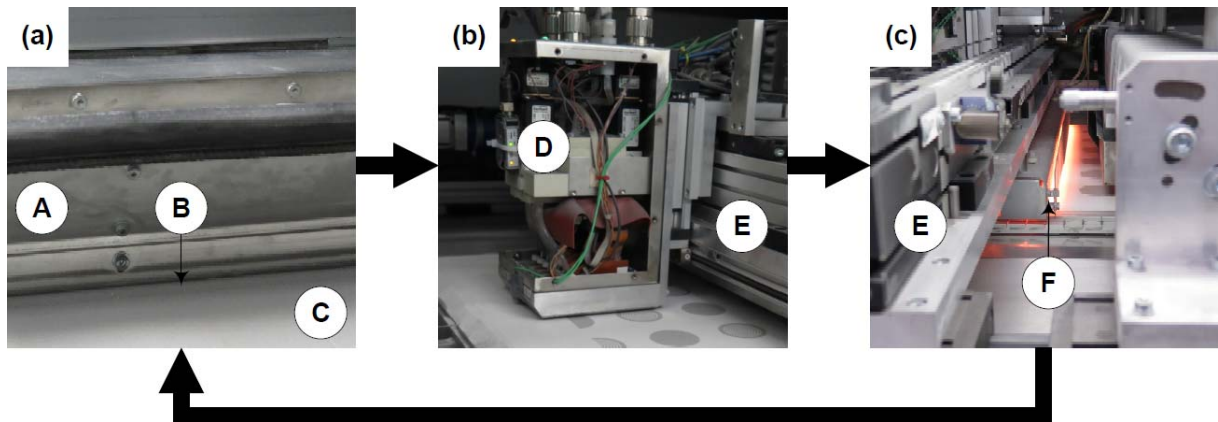


Abbildung 3: Schichtzyklus: Beschichten (a), Bedrucken (b) und Heizen (c). A = Beschichter, B = Materialwalze, C = Baufeld, D = Druckkopf, E = x-Achse, F = IR-Strahler

Die Steuerung des Heizungssystems und die Prozessüberwachung wurde mit Hilfe der Systemdesignsoftware NI LabVIEW, National Instruments Corporation, Austin, USA, umgesetzt. Folgende Hardwarekomponenten wurden verbaut:

- Finder 38.51.7.006.0050: Koppelrelais zum Auskoppeln des Anlagensignals
- NI cDAQ 9174: Chassis zur Montage der Komponenten im elektrischen Schaltschrank der VX500
- NI 9401: Digitaler Input zur Erfassung des Anlagensignals über Koppelrelais / Digitaler Output zur Ansteuerung der Wärmebildkamera
- NI 9263: 0 - 10 V analoger Output zur Steuerung des Leistungsstellers HERATRON CB 1x15 von 0 - 100%
- NI 9213: Analoger Input für das Anschließen und Auslesen der 12 Thermoelemente

Ausführliche Informationen zu den verbauten Komponenten können den entsprechenden Spezifikationen entnommen werden. Das Blockschaltbild befindet sich im Anhang. Die Verarbeitung der Steuer- und Messdaten erfolgt mit dem LabVIEW-Programm. Es ermöglicht die Erstellung von positions- und zeitabhängigen Leistungsprofilen für den IR-Strahler, steuert den Auslöser der WBK und zeichnet die Signale von den 12 verbauten Thermoelementen auf. Abbildung 4 zeigt einen Screenshot der Benutzeroberfläche des Programms.

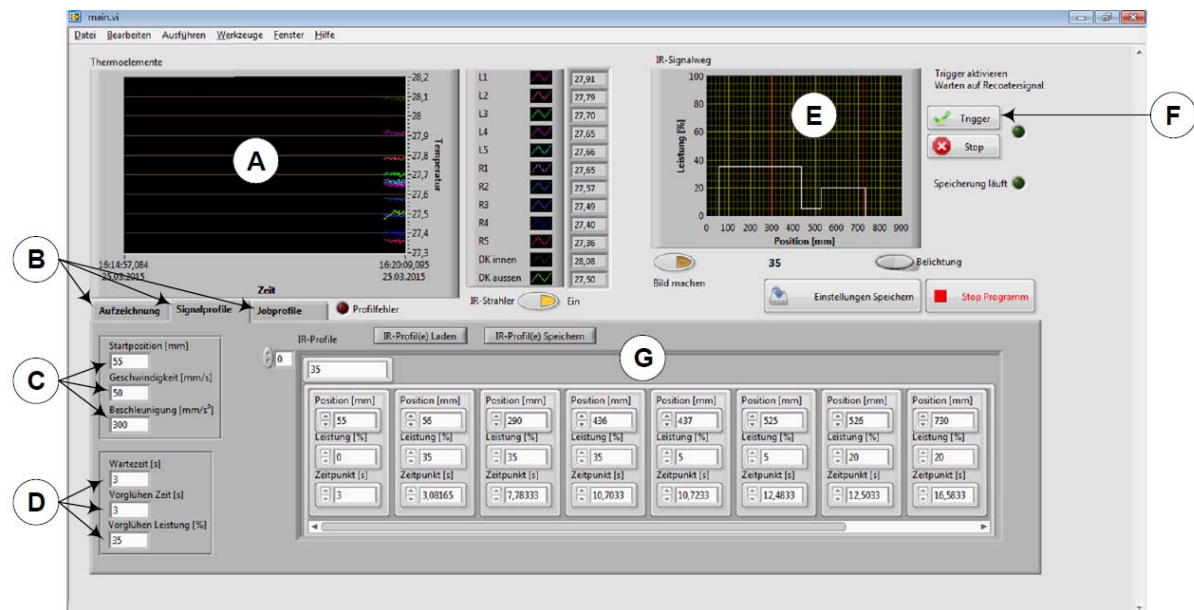


Abbildung 4: Screenshot des LabVIEW-Programms. A = Thermoelmenteanzeige, B = Reiterauswahl, C = Einstellungen Positionssystem, D = Warte- und Vorglühparameter, E = Visualisierung des Strahlerprofils, F = Trigger, G = Konfiguration des Strahlerprofils.

In dem oberen linken Fensterbereich befindet sich die graphische und digitale Visualisierung der Thermoelmente. Die Thermoelmente L1 - L5 befinden sich am linken Baufeldrand, R1 - R5 am rechten Baufeldrand. Des Weiteren befindet sich ein Drahtthermoelement innen (DK innen) und eines außen (DK aussen) am Druckkopf. Im Bereich rechts daneben wird die Leistungskurve des IR-Strahlers visualisiert, die im unteren Fensterbereich programmiert werden kann. Diese Programmierung basiert auf der Vorgabe von einer Soll-Leistung zwischen 0 und 100% sowie der entsprechenden Position. Aus der im linken unteren Bereich des Fensters vorzugebenden Beschleunigung und Geschwindigkeit der y-Achse können diese Positionen in Zeiten umgerechnet werden. Als Start-Signal, ab dem der Zähler des LabVIEW Programms läuft, wird der *slice_done* Befehl des 3-D-Druckers benutzt. Die Anlage gibt diesen Befehl nach jeder bedruckten Schicht aus. Der Befehl schaltet das Koppelrelais, welches wiederum von dem digitalen Input-Modul registriert und an das LabVIEW Programm weitergegeben wird. Sobald der Trigger des LabVIEW Programms aktiviert ist, kann das Anlagensignal empfangen und die Steuerung des IR-Strahlers zeitlich synchronisiert gestartet werden. Durch die Vorgaben in den Feldern Warte- bzw. Vorglühzeit wird die Vorwärmzeit des IR-Strahlers - standardmäßig drei Sekunden - sowie eine mögliche Wartezeit in der zeitlichen Abfolge berücksichtigt.

Die Überwachung der korrekten Funktionsweise des IR-Strahlers und die thermischen Auswirkungen der Belichtung auf die Baufeldoberfläche erfasst eine Wärmebildkamera vom Typ Avio Thermo GEAR G100EX des Herstellers NEC. Sie hat eine Auflösung von 320 x 240 Pixel bei einem Öffnungswinkel von 32° x 24°. Es ergibt sich eine optische Auflösung auf der Baufeldoberfläche von 2,26 mm/Pixel (x-Richtung) x 2,23 mm/Pixel (y-Richtung). Als Auslöser für die Bildaufnahme der WBK dient wiederum der zuvor beschriebene *slice_done* Befehl, welcher nach jeder fertig bedruckten Schicht ausgegeben wird. Die Verarbeitung der WBK-Aufnahmen erfolgt mit der zugehörigen Software irMOTION collection. Mit dieser Software lassen sich die vollradiometrischen jpg-Aufnahmen einlesen und auswerten. Durch das manuelle Setzen von Auswertepunkten auf die Positionen der gedruckten Proben können zeit- und ortsauflöste Temperaturprofile erzeugt werden.

6.2 AP 2: Druckkopfweiterung (Voxeljet)

In der ersten Projektphase wurde mit einem Druckkopf mit lediglich einem Druckmodul gearbeitet. Diese Maßnahme reduzierte das finanzielle Risiko im Falle einer irreversiblen Beschädigung der Module durch das verwendete, wasserbasierte Druckfluid. Aus Basis der Erkenntnisse aus der ersten Projektphase konnte ein Druckkopf mit sechs Druckmodulen (Standardausbaustufe der VX500) aufgebaut in Betrieb genommen werden. Für eine langfristig stabile Funktionsweise der Piezodüsen ist der Kontakt des Druckfluids mit unterschiedlichen metallischen Komponenten (z.B. Hülsen, Ventilen, etc.) innerhalb des Fluidsystems der Anlage unbedingt zu vermeiden. Dies verhindert Korrosion und die Ablagerung von Korrosionsprodukten im Fluidsystem. Ebenfalls führt die Entgasung des Druckfluids (100 mbar, 15 Minuten) zu deutlich verbesserten Druckergebnissen, da unerwünschte Blasenbildung in den Piezodüsen unterbunden wird. Abbildung 5 zeigt eine Fotografie des geöffneten Druckkopfs sowie ein Funktionsschaubild.

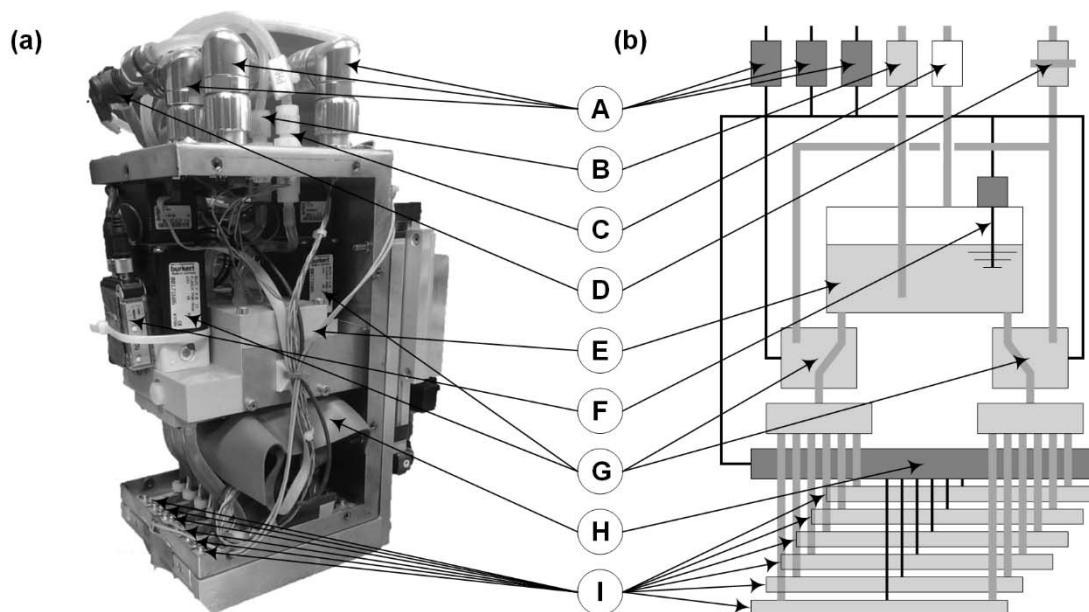


Abbildung 5: Geöffneter Druckkopf (a) und Funktionsschema (b): A = Elektrische Anschlüsse, B = Druckfluidversorgung, C = Unterdruckversorgung, D = Flow-Purge-Ventil, E = Fluidtank, F = Füllstandsensor, G = Verteilerventile, H = Steuerplatine, I = Druckmodule

Am oberen Ende des Druckkopfs befinden sich alle Anschlüsse für elektrische Steuerung, Druckfluid, Abfallfluid sowie für die Unterdruckversorgung. Die Unterdruckversorgung verhindert das schwerkraftbedingte Auslaufen des Druckkopfs. Der Füllstandsensor detektiert die Fluidmenge im Fluidtank und veranlasst bei Bedarf das Nachfüllen. Die Verteilerventile in Kombination mit dem Flow-Purge-Ventil dienen dem Spülen der Druckmodule. Im Schaubild stehen beide Verteilerventile auf der *Tank-Stellung*. Schaltet man eines der Verteilerventile auf die *Flow-Purge-Stellung*, können die Module mit Fluid durchgespült werden. Dies ist notwendig um Luftblasen, die sich bei Anlagenstillstand in den Modulen bilden können, aus diesen zu entfernen. Die sechs Druckmodule sind über Flexleiter mit der Steuerplatine kontaktiert, die durch eine Kunststoffolie gegen auslaufendes Fluid geschützt ist. Jedes der sechs Druckmodule vom Typ Spectra SL-128 AA, FUJIFILM Dimatix, Inc. beinhaltet 128 einzeln ansteuerbare Piezodüsen. Die einstellbaren Parameter des Druckkopfs bzw. der Module, wie beispielsweise Unterdruck, Spannung und Frequenz, müssen exakt auf das zu verarbeitende Druckfluid eingestellt werden, um eine stabile Tropfenerzeugung sicherzustellen. Für sämtliche Versuchsreihen wurde die Frequenz bei 10 kHz konstant gehalten. Der Unterdruck und die Spannung werden bei der

Überprüfung des Druckkopfzustands feinjustiert, bewegen sich jedoch meist im Bereich von 16,0 - 19,0 cm H₂O (Einheit des Unterdrucksensors an der Anlage) bzw. 65 - 85 V.

Durch den Abschluss der Arbeitspakete 1 und 2 konnte das Ziel 1 erreicht werden. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse des Analgenumbaues (AP 1 und 2).

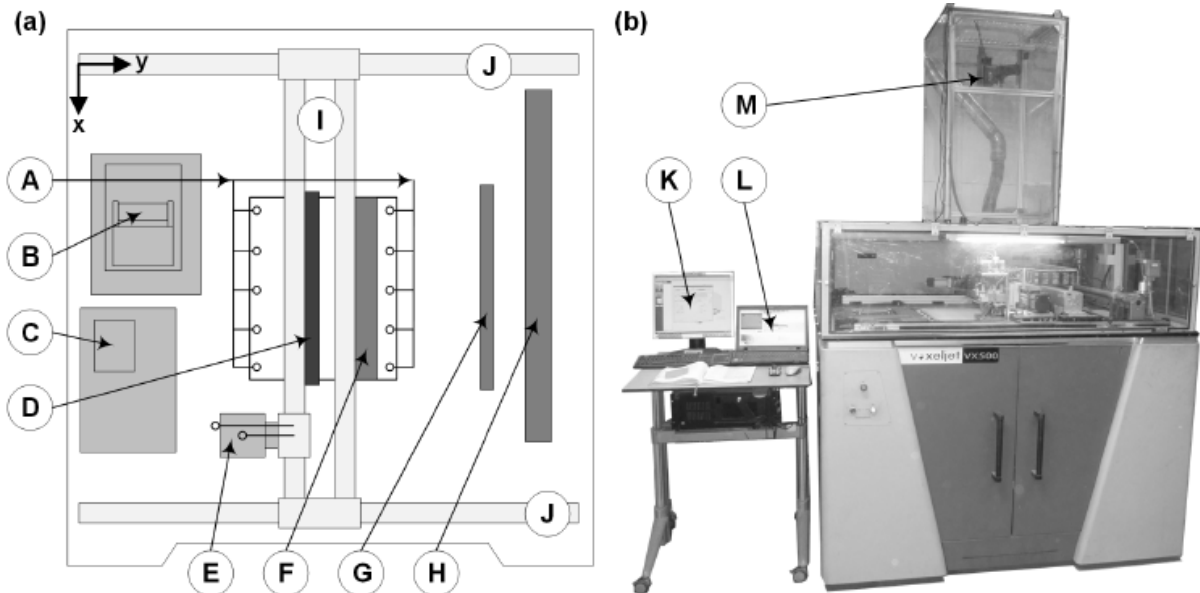


Abbildung 6: Schematische Draufsicht (a) und Fotografie (b) der modifizierten VX500 Versuchsanlage am Lehrstuhl utg: A = Thermoelemente zur Messung der Baufeldtemperatur, B = Reinigungsstation, C = Capping, D = IR-Strahler, E = Druckkopf (mit Thermoelementen), F = Beschichter, G = Materialfang, H = Schnecke, I = x-Achse, J = y-Achse, K = Anlagenrechner, L = Messrechner, M = Wärmebildkamera

6.3 AP 3: Aufbau erweiterter Sandprüfmethodik (utg)

Die im Rahmen der ersten Projektphase angeschafften und in Betrieb genommenen Formstoffprüfverfahren wurden in der zweiten Projektphase erweitert. Diese Erweiterung fand auf Basis der physikalischen, mechanischen und geometrischen Anforderungen statt, die an generativ hergestellten Sandgussformen und -kerne gestellt werden. Im Folgenden werden diese Anforderungen und die erarbeiteten Prüfverfahren vorgestellt. Die Prüfmethodik basiert auf dem sog. Standardjob. Er enthält 15 Prüfkörper des Typs *Scheibe* und 15 Prüfkörper des Typs *Ring*. Die Anordnung der Probekörper und deren Abmessungen sind in Abbildung 7 dargestellt.

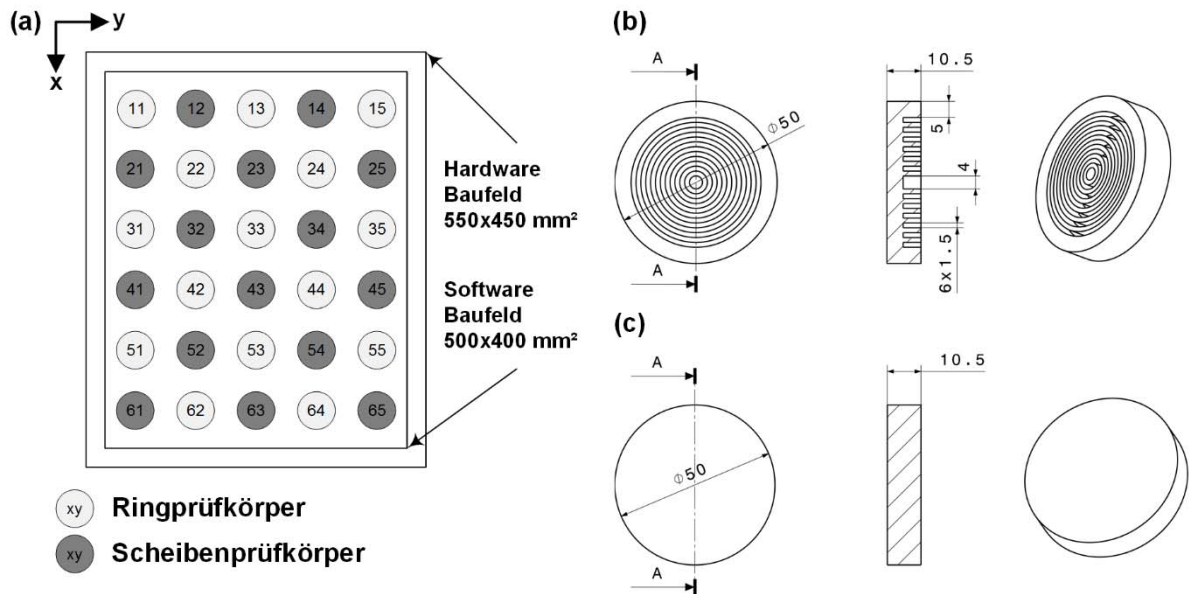


Abbildung 7: Anordnung der Prüfkörper in einer schematischen Draufsicht des Baufelds (a) und Konstruktionszeichnungen des Ringprüfkörpers (b) und des Scheibenprüfkörpers (c)

Die Prüflinge sind in einem Schachbrettmuster angeordnet und mittig bezüglich der x- und y-Abmessungen des Baufelds ausgerichtet. Die physikalische Größe des Baufelds (Hardwarebaufeld) beträgt 550 x 450 mm². Der bedruckbare Bereich - das Softwarebaufeld - hat die Abmessungen 500 x 400 mm². Der Zwischenraum zwischen den Probekörpern hat in beide Raumrichtungen eine Ausdehnung von 40 mm. Die Höhe des Standardjobs beträgt 20,5 mm, welche 82 Schichten bei einer Schichtstärke von 0,25 mm entspricht. Die Prüflinge befinden sich in den oberen 42 Schichten. Die unteren 40 Schichten dienen dem Erreichen von stationären Prozessbedingungen. Das Steuerungsprogramm der Anlage, RAPIX 3D, generiert die Bitmaps für jede der 82 Schichten und stellt sie dem 3-D-Drucker bereit.

Die Reihenfolge der Beschreibung erfolgt in chronologischer Analogie zu der Prüfreihefolge. Die aufeinanderfolgenden Prüfungen an demselben Probekörper ermöglichen die orts aufgelöste Quantifizierung von vier Qualitätsmerkmalen an jedem Scheibenprüfkörper und drei weiterer an jedem Ringprüfkörper.

6.3.1 Dichte

Das Hauptergebnis Dichte ρ^S lässt sich über die ermittelte Masse und das Volumen der Scheibenprüfkörper bestimmen. Abhängig von den Herstellungsbedingungen zeigen die Prüfkörper unterschiedliche Volumina. Mittels einer Stahlschablone lassen sich die Scheibenprüfkörper auf einen Nenndurchmesser von 50 mm und eine Nennhöhe von 10 mm abtragen. Die Einhaltung der Dimensionen wird mittels Messschieber überprüft. Abbildung 8 zeigt das manuelle Finishing und die Vermessung eines Scheibenprüfkörpers.

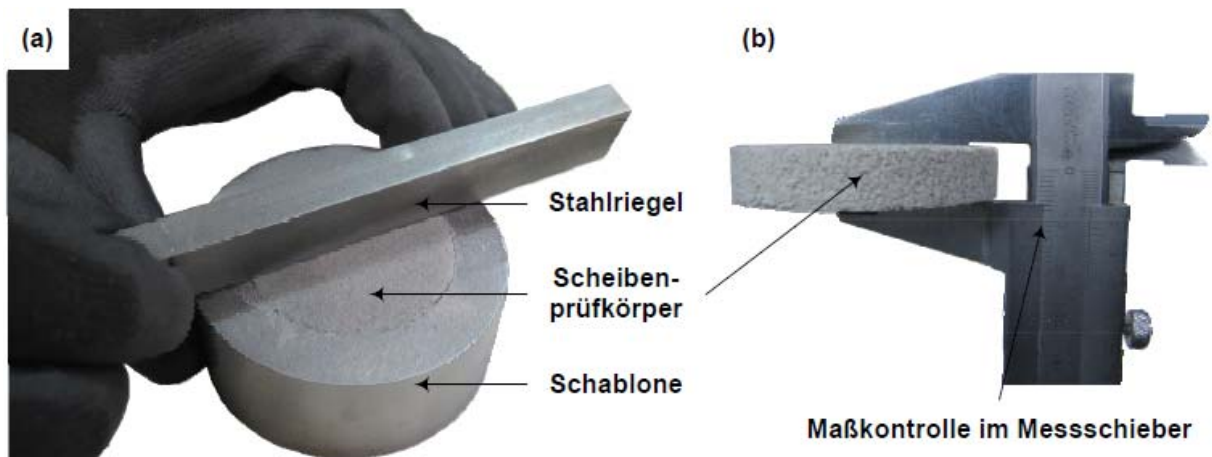


Abbildung 8: Im Zustand nach dem Druck-Prozess hat der Prüfling ein undefiniertes Volumen, welches durch Abtragen in einer Stahlschablone (a) auf das Nennmaß gebracht wird. Die Nennmaßkontrolle (b) erfolgt mithilfe eines Messschiebers.

Nach dem Finishing-Vorgang wird die Masse des Scheibenprüfkörpers mithilfe der Feinwaage bestimmt. Das Hauptergebnis Dichte berechnet sich als Mittelwert aus den Messdaten der 15 Scheibenprüfkörper eines Standardjobs. Dabei wird für die Masse der Mittelwert der gemessenen Gewichte der 15 Scheibenproben und für das Volumen das Nennvolumen von 19635 mm³ eingesetzt.

6.3.2 Permeabilität

Die Messung des Hauptergebnisses der Permeabilität K^S erfolgt gemäß VDG Merkblatt P41 [VDG96] mit einem Gasdurchlässigkeitsprüfgerät der Firma Morek Multiserw, Brzeznicza, Polen, vom Typ LPIR-3e. Abbildung 9 zeigt das Prüfgerät sowie ein Funktionsschaubild.

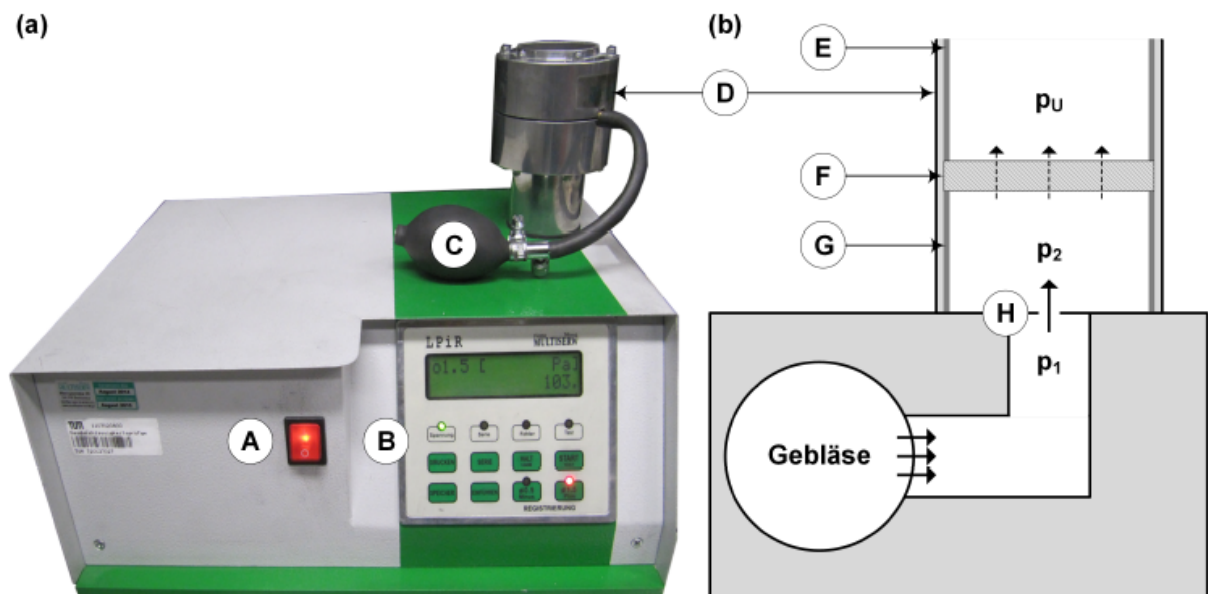


Abbildung 9: Fotografie und Funktionsschaubild des Gasdurchlässigkeitsprüfgeräts Typ LPIR-3e. A = Hauptschalter, B = Bedienpanel, C = Handpumpe, D = Dichtmanschette, E = Obere Positionierhülse, F = Scheibenprüfkörper, G = Untere Positionierhülse, H = Düse.

Vor Beginn der ersten Messung wird die korrekte Funktionsweise des Prüfgeräts mittels einer Kalibrierbüchse überprüft. Dabei sollte das Gerät mindestens fünf Minuten vor der Überprüfung

eingeschaltet werden, damit das Gebläse den Prüfüberdruck p_1 von 980 Pa relativ zum Umgebungsdruck p_U vor der Düse einregeln kann. Die untere und obere Positionierhülse richten den zuvor auf Nennmaß abgeriebenen Scheibenprüfkörper mittig in der Aufnahme aus, in der er durch händisches Aufpumpen der Dichtmanschette geklemmt und gedichtet wird. Das Gerät erfasst den Probenüberdruck p_2 und errechnet die Druckdifferenz $\Delta p_{1,2}$. Mithilfe einer quadratischen Näherung auf Basis der Umrechnungstabelle des Prüfgeräteherstellers (siehe Anhang) kann $\Delta p_{1,2}$ in die Permeabilität K^N eines Normprüfkörpers von 50 mm Höhe nach VDG Merkblatt P38 [VDG97] gemäß folgender Formel angenähert werden.

$$K^N = \frac{-0,8725}{(\Delta p_{1,2})^2} + \frac{3,13}{\Delta p_{1,2}} - 0,002176$$

Die Permeabilität hängt linear von der durchströmten Länge des porösen Körpers ab [HOEL13]. Da die Messung an dem Scheibenprüfkörper mit einer durchströmten Länge von 10 mm erfolgt, wird die Berechnung der Permeabilität eines Scheibenprüfkörpers entsprechend der Prüfkörpergeometrie angepasst. Dabei gilt:

$$K^S = \frac{K^N}{5}$$

Das Hauptergebnis Permeabilität K^S berechnet sich als Mittelwert aus den Messdaten der 15 Scheibenprüfkörper eines Standardjobs.

6.3.3 Bruchfestigkeit

Nachdem die nichtzerstörende Charakterisierung der Dichte und der Permeabilität abgeschlossen ist, erfolgt an den Scheibenprüfkörpern die zerstörende Ermittlung der Bruchfestigkeit σ_B^S . Hierbei findet ein für die Prüfung von anorganisch gebundenen Formstoffen modifizierter 4-Kugelversuch [DANZ02] Anwendung, der im Folgenden als *Scheibentest* bezeichnet wird. Das Prinzip der Lagerung auf drei Punkten und der Lasteinleitung über den Probenmittelpunkt bleiben unverändert. Die Grundsätzliche Eignung dieses Festigkeitsprüfverfahrens konnte nachgewiesen werden [RAMA14]. Der zunächst verwendete Aufbau erwies sich als Anfällig für mechanisches Verklemmen. Hier können während der Prüfung Sandpartikel in die Vorrichtung fallen und den Prüfablauf stören. Zur verbesserten Handhabung wurden die Kugeln durch sphärisch ausgeführte Stempel ersetzt. Abbildung 10 zeigt die verwendete Universalprüfmaschine vom Typ Z020, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, mit der Ausführung der Scheibentest-Prüfvorrichtung sowie eines Schemas des Prüfaufbaus zur Ermittlung der Bruchfestigkeit.

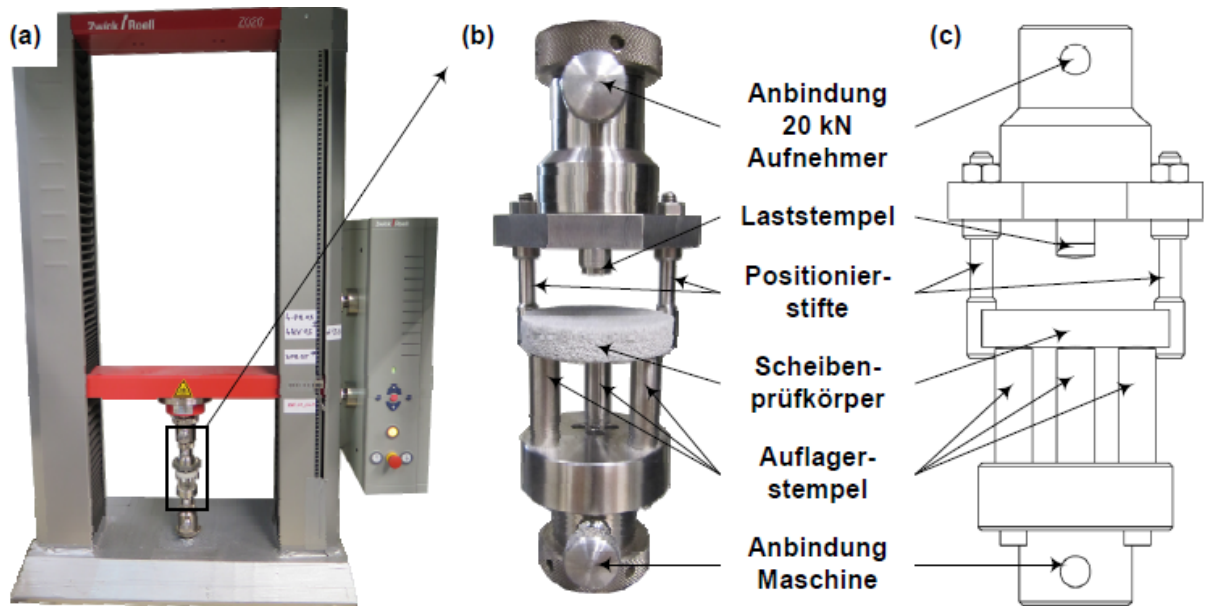


Abbildung 10: Universalprüfmaschine Z020 (a) mit eingebauter Scheibentest-Aufnahme (b) sowie einer schematischen Darstellung der Prüfsituation (c)

Die Aufnahme für den Scheibentest setzt sich im Wesentlichen aus drei Auflagerstempeln, einem Laststempel und zwei Positionierstiften zusammen. Die Stirnflächen der Stempel sind sphärisch mit einem Radius von 25 mm ausgeführt. Dies gewährleistet einen definierten Kontaktpunkt bei gleichzeitig minimierten Eingraben der Stempel in die Probe. Der Auflagerradius beträgt 19 mm. Bei diesen geometrischen Verhältnissen berechnet sich der zur Berechnung der Bruchspannung aus der Bruchkraft eingeführte Proportionalitätsfaktor f zu 1,444. Der Prüfkörper wird mit der abgeriebenen Seite nach oben auf die drei Auflagerstempel gelegt. Hat die Scheibe Kontakt zu beiden Positionierstiften, so ist die Zentrierung sichergestellt. Die Prüfung erfolgt mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 1 mm/min bis zum Bruch, der durch einen 80-prozentigen Kraftabfall detektiert wird. Eine 20 kN Kraftmessdose erfasst die Prüfkraft. Die Positionierstifte sind derart ausgeführt, dass sie den Kontakt zur Probe verlieren - unmittelbar bevor der Laststempel den Prüfling berührt. Dies stellt den gewünschten Kraftfluss durch Auflagerstempel, Scheibenprüfkörper und Laststempel sicher. Nach erfolgter Prüfung werden die Bruchstücke photographisch dokumentiert. Abbildung 11 zeigt beide Seiten eines charakteristisch gebrochenen Scheibenprüfkörpers.

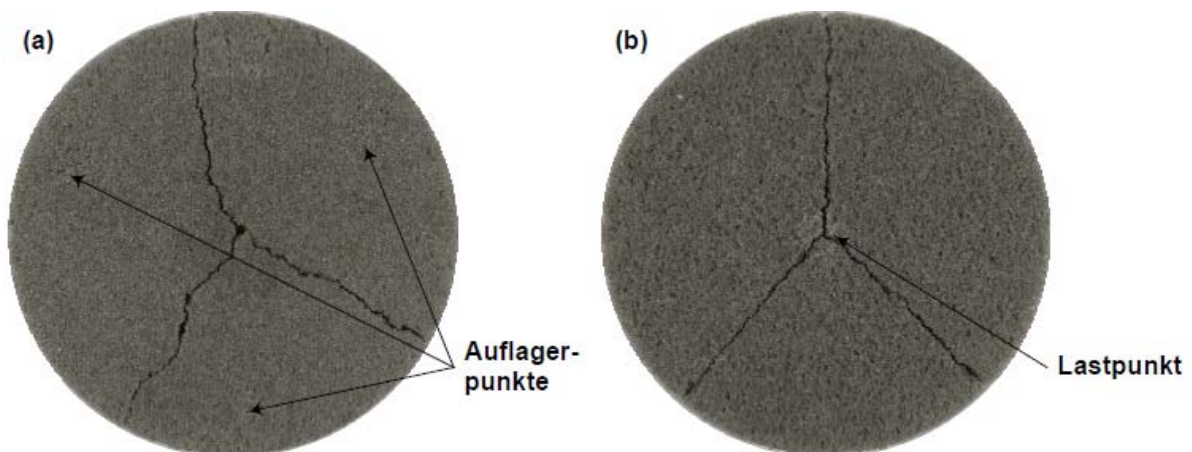


Abbildung 11: Charakteristisches Bruchbild eines Scheibenprüfkörpers von der Auflagerseite (a) und der Lastseite (b)

Die drei Auflagerstempel hinterlassen auf dem Prüfkörper leichte Abdrücke - zu erkennen an den hellen Verfärbungen der Probe. Aufgrund der höheren Flächenpressung hinterlässt der Laststempel im Zentrum der Probe einen deutlich sichtbaren Abdruck. Der Prüfkörper weist ein charakteristisches Bruchbild in Form von drei ähnlich großen Bruchstücken mit Bruchlinien entlang den Bereichen maximaler Zugspannung auf. Aus der gemessenen Bruchkraft F_B und der Probendicke t wird mithilfe folgender Formel die Bruchspannung berechnet [DANZ09]:

$$\sigma_B^S = f * \frac{F_B}{t^2}$$

Die Prüfung der Bruchfestigkeit erfolgt an allen 15 Scheibenprüfkörpern eines Standardjobs. Dementsprechend gibt das Hauptergebnis σ_B^S den Mittelwert aus 15 Messungen wieder.

6.3.4 Feuchtegehalt

Der letzte Charakterisierungsschritt bei der Bewertung der Scheibenprüfkörper ist die Bestimmung des Feuchtegehalts. Diese erfolgt in der Trockenwaage vom Typ DBS der Firma Kern & Sohn GmbH. Die Trocknung findet bei 200°C über einen Zeitraum von 15 Minuten statt. Dazu werden die Bruchstücke von zwei Scheibenprüfkörpern, die gemeinsam ein Gewicht von ca. 50 g besitzen, in die Trockenwaage eingelegt und getrocknet. Das Hauptergebnis φ^S ist der Messwert dieser Prüfung. Mit der Bestimmung des Feuchtegehalts ist die Bewertung der Scheibenprüfkörper abgeschlossen. Der Scheibenprüfkörper #43 eines jeden Standardjobs wird zu Zwecken der Archivierung eingelagert. Alle anderen Bruchstücke der Scheibenprüfkörper werden entsorgt und es kann mit der Charakterisierung der Ringprüfkörper fortgefahren werden.

6.3.5 Curlneigung

Zur Bewertung der Maßhaltigkeit wurde die Curlneigung der Probekörper untersucht. Bei thermisch unterstützten, additiven Fertigungsverfahren ist häufig mit Bauteilverzug im Bauprozess, dem sogenannten *Curl* zu rechnen. Tritt *Curl* während des Prozesses auf, so äußert sich dies an einer Verschiebung der filigranen Ringe des Ringprüfkörpers. Diese Verschiebung tritt auf, wenn sich Bereiche des Rings von der Oberfläche des Materialbetts abheben und bei der Überfahrt des Beschichters in y-Richtung erfasst werden. Tritt besonders starker *Curl* auf, so kann dies zu der Zerstörung von Prüfkörpern und im Extremfall zum Abbruch des Jobs führen. Abbildung 12 zeigt am Beispiel von fünf repräsentativen Proben wie sich *Curl* bei der optischen Bewertung des Ringprüfkörpers äußert.

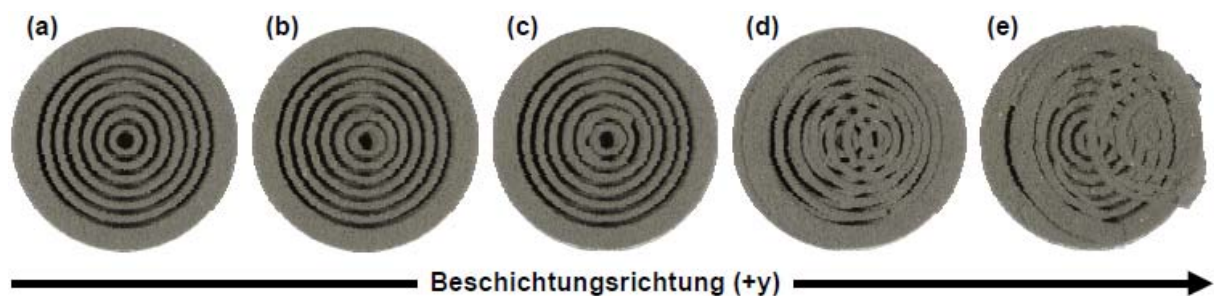


Abbildung 12: Unterschiedliche Ausprägungen von *Curl* am Beispiel von fünf repräsentativen Ringprüfkörpern. Kein *Curl* (a), minimale Verschiebung (b), leichte Verschiebung (c), starke Verschiebung (d) und zerstörte Ringprobe (e).

Das Hauptergebnis der Curlneigung C^R gibt an wie viele der 15 Ringproben eines Standardjobs von Curl mit den Ausprägungsgraden (c), (d) und (e) betroffen sind. Ringprüfkörper, die von Curl diesen Ausmaßes betroffen sind, werden für die nachfolgenden Charakterisierungsschritte ausgeschlossen.

6.3.6 Fluidmigration

Da Curl nur bei einer geringen Anzahl der durchgeführten Untersuchungen auftritt, können in der Regel alle 15 Ringprüfkörper zur Bestimmung der Fluidmigration herangezogen werden. Im Gegensatz zu den Scheibenprüfkörpern erfolgt hierbei das Finishing ausschließlich mit einer Druckluftpistole und einem definierten Arbeitsdruck von 8 bar. Die Ringprüfkörper werden mit größtmöglicher Sorgfalt auf der Anlage entnommen und mit der Druckluft abgeblasen. Der Luftstrom entfernt ungebundenes Partikelmaterial in den Zwischenräumen der filigranen Ringe. Nach dem Ausblasen von ca. 10 Sekunden wird jede Probe unmittelbar auf die Feinwaage abgelegt und ihr Gewicht m^R ermittelt. Abbildung 13 zeigt jeweils zwei Ringprüfkörper vor und nach dem Finishingvorgang.

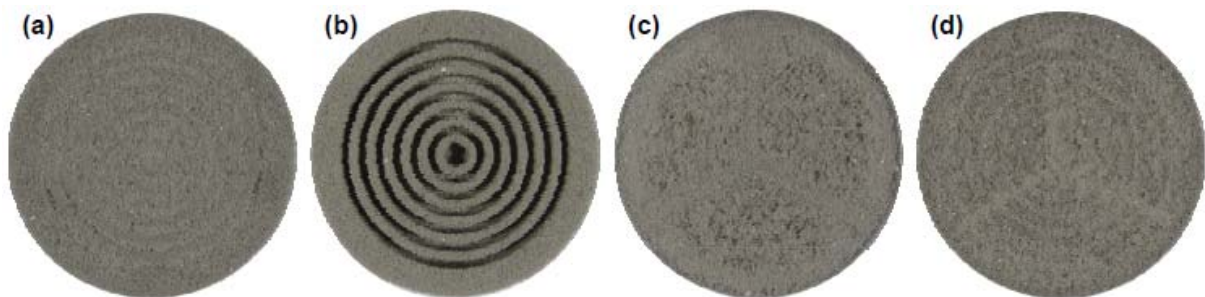


Abbildung 13: Ringprüfkörper vor und nach dem Finishing mit Druckluft. Bei geringem Auftreten von Fluidmigration (a) ist das Material in den Stegzwischenräumen ungebunden und kann ausgeblasen werden (b). Bei starker Fluidmigration (c) ist das Material gebunden und kann nicht durch das Finishing mit Druckluft entfernt werden (d).

Der Luftstrom der Druckluftpistole entfernt ungebundenes Material aus den Stegzwischenräumen der Probe. Je stärker Fluidmigration auftritt, desto mehr Material bleibt in Form von Anhaftungen in den Stegzwischenräumen zurück. Diese Anhaftungen führen zu einer Gewichtszunahme, die mittels der Feinwaage gemessen wird. Die Fluidmigration eines jeden Prüflings drückt aus, wie viel Prozent seine Masse über der Sollmasse des Ringprüflings liegt. Diese ist aus der Dichte der Scheibenprüfkörper und dem Nennvolumen des Prüflings (aus den CAD-Daten) bekannt. Das Hauptergebnis Fluidmigration Δm_F^R gibt den Mittelwert aller bewerteter Ringprüfkörper eines Standardjobs (i.d.R. 15 Stück) wieder.

6.3.7 Abrieb

Als finaler Schritt der Quantifizierung der Qualitätsmerkmale erfolgt die Bewertung der Ringprüfkörper hinsichtlich ihrer Abriebbeständigkeit. Dazu kommt ein eigens entwickeltes Abriebprüfgerät zum Einsatz, dessen Ausführung und Funktionsweise in Abbildung 14 veranschaulicht wird.

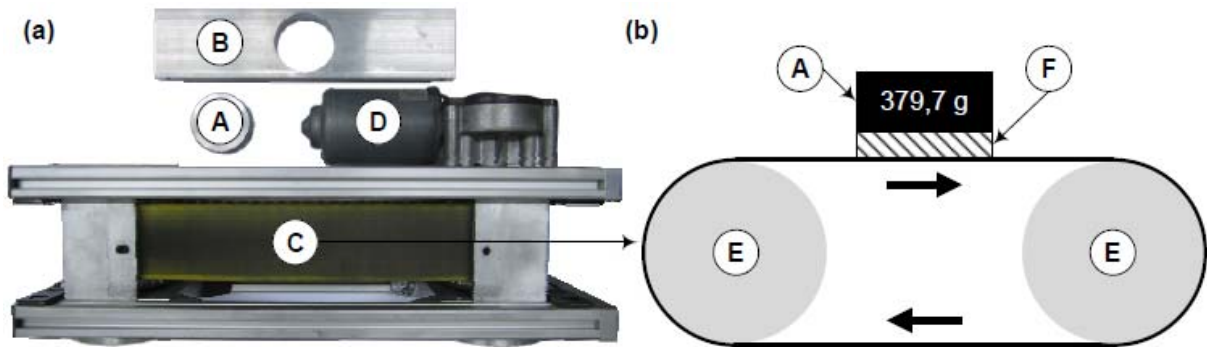


Abbildung 14: Reale Ausführung des Abriebprüfgeräts in der Draufsicht (a) und Schema der Funktionsweise in der Seitenansicht (b). A = Referenzgewicht, B = Halterung, C = Abriebband, D = Antrieb, E = Zahnräder, F = Ringprüfkörper.

Der Ringprüfkörper wird mittels einer Halterung relativ zum Abriebband fixiert und durch Auflegen eines Referenzgewichts von 379,7 g mit einer Kraft von 3,72 N belastet. Nach dem Einschalten des Geräts reibt das Band 20 Sekunden lang die Unterseite des Prüfkörpers ab. Nach der Prüfung erfolgt eine erneute Gewichtsbestimmung über die sich der Abrieb Δm_A^R jeder der 15 Ringprüfkörper bestimmen lässt. Das Hauptergebnis Abrieb Δm_A^R gibt den Mittelwert aller bewerteten Ringprüfkörper eines Standardjobs wieder.

6.3.8 Qualitative Bewertung

Im Rahmen der qualitativen Bewertung wird der optische und haptische Eindruck der Prüfkörper beschrieben. Hierbei wird jeweils auf diejenigen Probekörper eingegangen, die mit den Extremwerten des jeweiligen Faktors hergestellt wurden. So können die qualitativen Unterschiede am prägnantesten zum Ausdruck gebracht werden. Zur Charakterisierung der Mikrostruktur dienen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen. Diese wurden an einem Rasterelektronenmikroskop (REM) mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) vom Typ JOEL JSM-5900LV des Fachgebiets Elektronenmikroskopie der TUM aufgenommen.

6.4 AP 4: Weiterentwicklung Sand-Binder-System (Voxeljet)

Bereits im Vorfeld zu diesem Projekt wurde von der voxeljet AG in Zusammenarbeit mit der Hüttenes-Albertus GmbH (HA) ein rein anorganisches Materialsystem für den 3D-Druck entwickelt. Dieses lehnt sich an die Sand-Binder-Kombination an, die bereits in der konventionellen Form- und Kernherstellung verwendet wird. Die Feststoffkomponente besteht hierbei aus einem Gemisch aus einem Quarzsand von sphärischen Partikeln (HSQ) und einem sprühgetrockneten Wasserglas, das weitere, vom Hersteller nicht näher spezifizierte Zusätze enthält. Die flüssige Binderkomponente besteht weitgehend aus Wasser und rein anorganischen Zusätzen, um die Rheologie der Mischung entsprechend den Anforderungen der Piezomembrandruckköpfe einzustellen. Dabei steht die Druckstabilität und sichere Prozessierbarkeit im Mittelpunkt der Entwicklung des flüssigen Binders. Auch wenn sich bereits mit diesem Materialsystem Gussformen und -kerne herstellen ließen, zeigte sich, dass weitere tiefere Entwicklung notwendig sind, um die Materialkennwerte auf der einen Seite und Formstabilität sowie die Abbildungsschärfe auf der anderen Seite, massiv zu verbessern.

6.4.1 Variation des Wasserglasgehaltes

Maßgeblich für die Festigkeit 3D gedruckter Körper mit diesem Anorganikmaterialset ist das sprühgetrocknete Wasserglas im Sand. Dieses wird beim Bedrucken mit der flüssigen Komponente zum Teil angelöst, wobei eine chemische Vernetzung innerhalb des Wasserglases aber auch chemische

Bindungen zum Sand entstehen. Das Anlösen des Wasserglases und Verdampfen des Binders sowie auch das chemische Abbinden der Silanolgruppen wird während des Druckprozesses mit einer IR-Lampe unterstützt. Die IR-Lampe belichtet einerseits die gedruckte Schicht und erwärmt im darauffolgenden Beschichtungsschritt die neue Sandlage. Es zeigte sich, dass je höher der Wasserglasgehalt im Sand gewählt wird, desto höher wird die Festigkeit der Bauteile. Ausschlaggebend für den Metallguss ist die Entkernbarkeit der Sandformen nach dem Guss. Aus diesem Grund werden Festigkeiten angestrebt, die im Bereich von 250 N/cm^2 – 400 N/cm^2 liegen. Diese Festigkeiten werden mit einem Wasserglasgehalt von 12.5% sicher erreicht, jedoch ist die Finishbarkeit der Bauteile mit diesem Anteil recht hoch, da die Anhaftungen ebenfalls fest am eigentlichen Bauteil kleben. Daher wurde in Versuchsreihen versucht den Wasserglasanteil dahingehend zu optimieren, dass Anhaftungen nur noch in geringem Maßstab auftreten bzw. leicht entfernt werden können. Die Bauteile mit den unterschiedlichen Wasserglasanteilen wurden auf einer VX-800 gedruckt und jeweils 16 h im Pulverbett belassen. Die Oberflächentemperatur des Baufeldes wurde durch Anpassung der Lampenleistung auf $50 \text{ }^\circ\text{C}$ – $55 \text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt und mit einer IR-Kamera überwacht. Die Luftfeuchtigkeit betrug ca. 55%. Nach dem Finishen wurden die Teile im Ofen bei $220 \text{ }^\circ\text{C}$ für 1 h getrocknet und anschließend vermessen. Die Festigkeiten wurden an einer 3-Punkt-Biegetestmaschine gemessen.

Tabelle 1: Einfluss des Wasserglasanteils auf die Festigkeit und Dichte der Bauteile

Anorgitgehalt [%]	Festigkeit [N/cm^2]	ρ [g/cm^3]	Gewicht [g]
7	110	1,35	121,5
	110	1,35	121,3
9	180	1,35	122,3
	220	1,32	120
10	140	1,31	117,9
	130	1,30	117,4
11	220	1,28	115,3
	230	1,28	115,6
13	240	1,25	112
	250	1,25	113,3

Tabelle 1 zeigt, dass die Festigkeiten der Bauteile mit sinkenden Anorgitgehalt ebenfalls abfallen. Bereits ab einem Gehalt von 10% liegen die Biegefestigkeiten deutlich unter gewünschten Festigkeiten, die noch ein sicheres Handling der gedruckten Körper erlauben. Anhaftungen werden mit zunehmenden Wasserglasanteil immer stärker und lassen sich immer schlechter vom Bauteil entfernen. Bei einem Gehalt von 7% reichte bereits reines Abblasen mit Druckluft, um den gedruckten Körper von überschüssigen Material zu befreien. Wohingegen bei einem Anteil von 13% auch intensive mechanische Nachbearbeitung hierfür nicht völlig ausreichte und Details nicht mehr dargestellt werden konnten. Auffallend ist auch, dass mit zunehmenden Anorgitgehalt die Dichte der Bauteile absinkt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass durch die Zugabe von feinem Wasserglas die Sandkörner eine immer weniger dichte Packung erreichen. Es zeigte sich, dass aufgrund der notwendigen Festigkeiten ein Wasserglasgehalt von mindestens 11% notwendig ist, um die gewünschten Festigkeiten zu erreichen, dabei stellt der Bereich zwischen 11% und 12.5% einen Kompromiss zwischen akzeptabler Finishbarkeit und ausreichender Festigkeit dar.

6.4.2 Klimatisierung / Befeuchtung des Bauraumes

Das Materialsystem beruht wie schon im Abschnitt 5.4. erwähnt auf einem Spezialsand, der aus sphärischen Partikeln besteht. Dieser erwies sich in Vorversuchen gegenüber den Standardgießereisanden als überlegen, da er als einziger in den Vorversuchen geeignete Bauteile zugänglich machte. Allerdings ist dieser Sand wirtschaftlich gesehen weniger interessant, da der Preis mit ca. 450 €/t etwa 7.5-mal teurer ist als gewöhnliche Quarzsande. Daher wurde in einer größeren Versuchsreihe versucht, diesen Sand durch einen kostengünstigeren zu ersetzen. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung standen vor allem Standardgießereisande unterschiedlicher Korngröße (bspw. GS09, GS14, GS25, Baums) und deren Mischungen. Außerdem wurde versucht wenigstens den Anteil des teureren HSQ durch Zumischung günstigerer Sande zu senken. Es wurde vermutet, dass für den geringen Erfolg von Standardsanden in den Vorversuchen die vorherrschende Luftfeuchtigkeit im Bauraum war. Es wurde angenommen, dass die Erhöhung der Luftfeuchte auf 60% - 70% das Anlösen des festen Wasserglases verbessert und die eingedruckte Feuchtigkeit nicht nur von den feinen Sandpartikeln und daraus resultierenden größeren Oberflächen adsorbiert wird.

Tabelle 2: Festigkeiten in Abhängigkeit von der Sandart, Anorgitgehalt und Eintrag

Sandart	Anorgitgehalt [%]	Eintrag [%]	Festigkeit [N/cm ²]
GS14	6	12	280
GS14	8	12	270
GS14	10	12	270
GS14	12,5	12	275
GS14	12,5	13	300
GS14	12,5	11,8	250
Baums	8	13,2	260
Baums	10	13	290
Baums	6	13	240
GS09	12,5	14	320
GS09	12,5	13	300
GS09	12,5	15	280
GS14/Baums ^{*)}	12	12	190
GS09/Baums ^{*)}	12	12	190
HSQ/GS25 ^{*)}	12	12	240
HSQ/GS09 ^{*)}	12,5	11,9	330
HSQ/GS14 ^{*)}	12,5	11,9	330
HSQ/Baums ^{*)}	10	11,9	240
Referenz	12,5	12	400

^{*)} 50/50

Außer bei GS09 wurde bei allen Versuchen ein Bindereintrag von 11.8% - 13.2% verwendet. Nachdem GS09 von allen verwendeten Sandsorten die größte spezifische Oberfläche besitzt, musste der Bindereintrag auf 13%-15% erhöht werden. Als Referenz diente jeweils das Materialsystem mit HSQ und Anorgit (10%) bei 12% Eintrag. Tabelle 2 zeigt, dass bei GS14 unabhängig vom Anorgitgehalt im gemessenen Rahmen die Festigkeiten nach dem Ofenprozess bei 270 N/cm² liegen und damit im akzeptablen Bereich. Jedoch wiesen die Bauteile starke Anhaftungen auf, die nur schlecht und mit großem Aufwand entfernt werden konnte. Filigrane Form- bzw. Kernstrukturen sind nicht darstellbar. Ein vergleichbares Verhalten zeigen die Versuche mit Baums aber auch mit GS09 auch wenn bei GS09

die Festigkeit bei allen Versuchen über 300 N/cm² liegt. Auch konnten bei den 50/50 Mischungen der wirtschaftlicheren Sandarten nicht die Leistung des Referenzbauteils hinsichtlich Festigkeit und Finishbarkeit erreicht werden. Gibt man den GS-Sorten wie auch dem Baums-Sand wieder HSQ zu, werden die Kennwerte wieder besser, allerdings weisen die Bauteile in dieser Kombination eine schlechte Kantenschärfe und geringe Detailtreue auf.

6.4.3 VX-AOB 2

Hinsichtlich einer weiteren Optimierungsmöglichkeit und den Anorgitgehalt weiter senken zu können ohne Festigkeit zu verlieren aber verbesserte Finishbarkeit zu erzeugen, wurde der Mischprozess des Partikelmaterials verändert. Die anfänglichen Mischungen, wurden mit Stahlkugeln (d=1 mm) als Mischhilfe in einem Trommelmischer vermischt. Um das Wasserglas homogener in den Sand einzumischen, wurde ein Zwangsmischer ohne Mischhilfe verwendet. Das Ergebnis war eine sichtbar homogenere Mischung.

Tabelle 3: Eintragsreihe mit dem homogen gemischten Sandsystem

Eintrag [%]	GTF [N/cm ²]	Festigkeit [N/cm ²]	Anmerkung
12	300	200	Viel Anhaftungen, kaum Details, starke Penetration nach unten
11,5	250	200	Viel Anhaftungen, kaum Details, starke Penetration nach unten
11	100	280	Viel Anhaftungen, wenig Details, starke Penetration nach unten
11,3	310	n.b.	Keine Anhaftungen, viele Details, keine Penetration nach unten
11,5	280	150	Wenig Anhaftungen, viele Details, kaum Penetration nach unten
10	200	<100	Wenig Anhaftungen, viele Details, kaum Penetration nach unten
9	100	100	Wenig Anhaftungen, viele Details, starke Penetration nach unten
8	100	80	Wenig Anhaftungen, viele Details, keine Penetration nach unten
11,67	260	100	Wenig Anhaftungen, viele Details, kaum Penetration nach unten

In Tabelle 3 sind die Grünfestigkeiten als auch die Festigkeiten nach dem Ofenprozess (1h @ 220 °C) dargestellt. Erstaunlicherweise schwanken die Festigkeitswerte innerhalb eines sehr begrenzten Eintragsbereichs sehr stark. In gleicher Weise verhält es sich mit den Anhaftungen und der Detailtreue. Innerhalb von 0.5 Eintragsprozentpunkten zwischen 11%-11.5% bewegt sich die Festigkeit von 100 N/cm² über 310 N/cm² bei 11.3% zu 280 N/cm² bei 11.5%. Während bei 11% die Bauteile starke Anhaftungen und kaum Detailtreue aufweisen, lassen sich die gedruckten Körper mit einem Eintrag von 11.3% mühelos finishen und weisen auch keine Anhaftungen auf, auch nicht in z-Richtung. Auffallend ist die Tatsache, dass sich die Festigkeit bei fast allen Proben gegenüber der Grünfestigkeit verschlechtert. Grund hierfür ist das andere Verhalten des anders gemischten Sandes während des Druckprozesses. Nachdem das Wasserglas durch das veränderte Mischen homogener und auch feiner verteilt ist, erreicht man bei den meisten verwendeten Einträgen bereits nach dem Drucken die Endfestigkeit. Im Ofen verliert das Bauteil neben dem freien Wasser auch gebundenes Hydratwasser, das zur Festigkeit beiträgt. Durch zu hohe Temperaturen über einen längeren Zeitraum wird die Festigkeit irreversibel verringert. Über dieses Projekt hinaus müssen diesbezüglich noch weitere Untersuchungen über das Trocknungsverhalten der Bauteile mit VX-AOB 2 durchgeführt werden.

6.4.4 Optimierung des flüssigen Binders und dessen Prozessierung

Von großer Bedeutung beim Drucken mit diesem Materialsystem ist die Druckstabilität des Druckfluids. Hierbei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Tropfenmassenstabilität während des Baujobs aber

auch auf der Verträglichkeit des Druckfluids mit dem Druckmodul. Dabei soll der Druckkopf auch bei kleineren unvorhergesehenen Ereignissen wie Strom- oder Druckluftausfall nicht irreversibel geschädigt werden können. Im Laufe der Experimente, zeigte sich immer wieder, dass einzelne Druckmodule korrodierte Bereiche aufwiesen und das abgegebene Druckfluid rostbraun verfärbt war. Zerlegt man ein Modul des Druckkopfes können korrodierte Bereiche und Ablagerungen festgestellt werden.

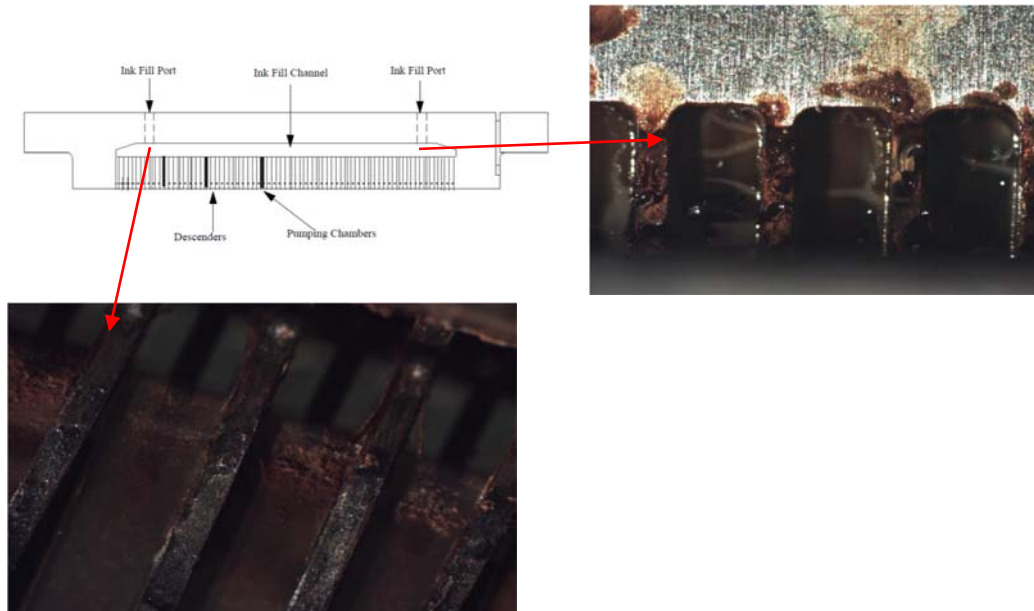


Abbildung 15: links oben: schematische Darstellung eines Moduls, Ablagerungen im Druckmodul, korrodierte Bereiche.

Verantwortlich hierfür ist die alkalische Binderlösung in Kombination von gelösten Sauerstoff zu sehen. Als Folge dieser Untersuchung wurde der Binder bevor er der Maschine zugeführt wurde fortan unter vermindertem Druck entgast.



Abbildung 16: Entgasen des Binders in einer Vakuumpumpe

Diese Maßnahme brachte neben einer massiv verlängerten Lebensdauer der Druckmodule, noch eine deutliche Verbesserung der Druckstabilität. Bei nicht entgasten Bindern konnten immer wieder kleine Bläschen in den Schläuchen vom Binderreservoir zum Druckkopftank beobachtet werden. Dies hatte zur Folge, dass sich immer wieder kleine Luftbläschen in den Düsenkammern der Module sammelten

und diese praktisch unbrauchbar machten. Es war immer ein manuelles oder pneumatisches Purgen notwendig, um die feinen Bläschen aus den Düsenkanälen zu drücken. Letztlich führten diese feinen Blasen immer wieder zu Einbußen an Qualität der Bauteile.

Durch die in AP 4 gewonnenen Erkenntnisse konnte das Ziel 3 erreicht werden.

6.5 AP 5: Aufnahme Ist-Zustand nach Umbaumaßnahmen (utg)

Die Definition eines aussagekräftigen und reproduzierbar einstellbaren Ausgangspunkts ist Grundvoraussetzung für die Durchführung der Faktorvariation. Dieser Ausgangspunkt ist der sog. Referenzjob. Die wesentlichen, bei der Definition des Referenzjobs erarbeiteten, Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

6.5.1 Homogenisierung des Energieeintrags

Die thermische Prozessführung war ein zentraler Bestandteil der durchgeführten Untersuchungen. Im AP 1 wurden die experimentellen Maßnahmen zur Steuerung und Überwachung des Energieeintrags vorgestellt. Der Ausgangspunkt für die Faktorenvariation soll bei aktivem IR-Strahler konstante Versuchsbedingungen während der Herstellung der Prüflinge ermöglichen. Des Weiteren ist eine homogene Ausprägung der Prozess-, und Prüflingeigenschaften in Bezug auf ihre Position im Bauraum anzustreben. Da die Hauptergebnisse einen Mittelwert der Eigenschaften der jeweiligen Prüflinge eines Jobs darstellen, resultiert eine hohe Homogenität in einer geringen Standardabweichung der Hauptergebnisse. Diagramm 1 zeigt den Verlauf der Oberflächentemperaturen an fünf Positionen im Baufeld ohne eine positions- und schichtzahlabhängige Leistungssteuerung.

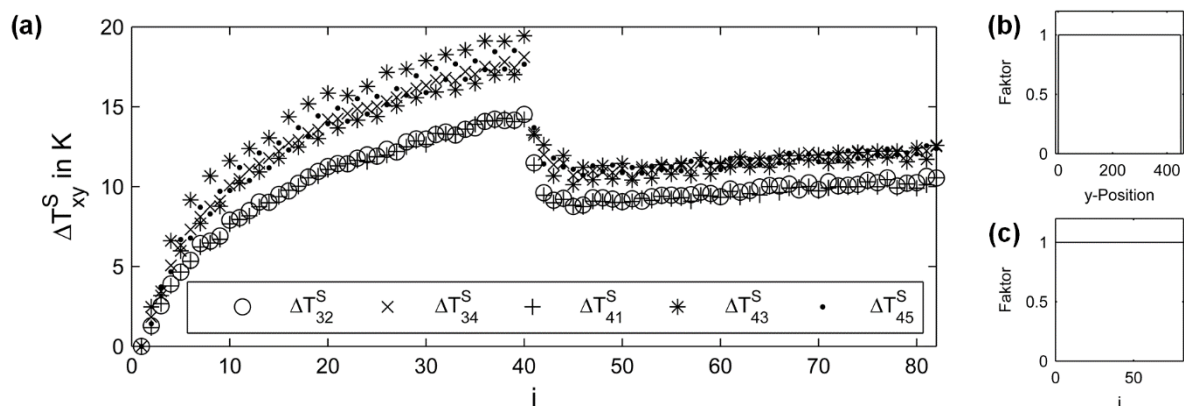


Diagramm 1: Erwärmung von Scheibenprüfkörpern an fünf verschiedenen y-Positionen ohne positions- und schichtzahlabhängige Leistungssteuerung (a). Leistungsfaktor über der y-Position (b) und über der Schichtzahl (c).

Ohne gezielte Steuerung bringt der Strahler einen konstanten Energieeintrag von 4,337 kJ pro Schicht über die gesamte Prozessdauer und über das gesamte Baufeld ein. Ein gleichbleibender Energieeintrag über die gesamte Prozessdauer hinweg (c) resultiert in stetig steigenden Oberflächentemperaturen während dem Drucken von Schicht 40 bis 82. Weiterhin bewirkt ein konstanter Energieeintrag über das gesamte Baufeld (b) einen inhomogenen Temperaturanstieg - zu erkennen an den geteilten Punkteschaaren. Diagramm 2 zeigt das Ergebnis der beiden wesentlichen Maßnahmen zur Homogenisierung des Energieeintrags. Diese sind zum einen die positionsabhängige Steuerung der Strahlerleistung und zum anderen die Reduktion der Strahlerleistung mit zunehmender Schichtanzahl.

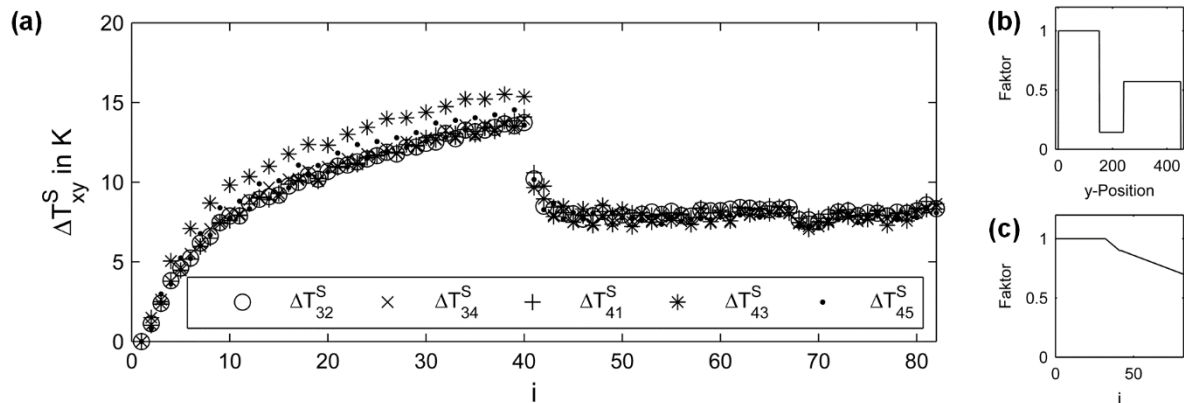


Diagramm 2: Erwärmung von Scheibenprüfkörpern an fünf verschiedenen y-Positionen mit positions- und schichtzahlabhängiger Leistungssteuerung (a). Leistungsfaktor über der y-Position (b) und über der Schichtzahl (c).

Das stufenförmige Leistungsprofil (b) bewirkt eine Homogenisierung der Oberflächentemperaturen (a) der an unterschiedlichen y-Positionen gedruckten Prüfkörper. Die Erwärmung der Anlage und die damit verbundene steigende Oberflächentemperatur der Prüfkörper werden durch ein fallendes Leistungsprofil über die Schichtzahl (c) kompensiert. Der geringfügige Temperaturabfall um Schicht 70 ist auf eine Bestimmung der In-Prozess-Tropfenmassen zurückzuführen: Hierbei wird der Bauprozess für ca. 30 Sekunden unterbrochen, wodurch es zu einem leichten Temperaturabfall kommt. Diagramm 3 illustriert die Temperaturverteilung für alle Prüfkörper eines Jobs ohne und mit positions- und schichtzahlabhängiger Leistungssteuerung.

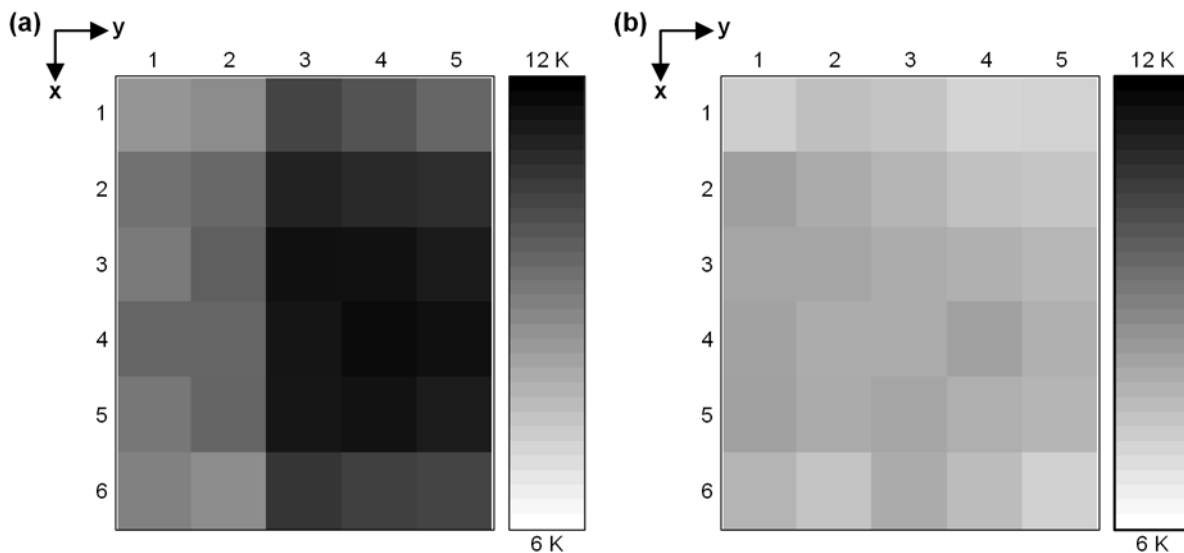


Diagramm 3: Mittlere Erwärmung der Prüfkörper ohne (a) und mit (b) Leistungssteuerung

Die bereits in Diagramm 1 dargestellten Temperaturinhomogenitäten ohne eine gezielte Leistungssteuerung werden bei dieser Darstellungsweise über das gesamte Baufeld hinweg verdeutlicht. Bei konstantem Strahlerprofil (a) zeichnen sich deutliche Temperaturunterschiede im linken (y-Spalten 1 und 2) und rechten Baufeldbereich (y-Spalten 3, 4 und 5) ab. Die maximale Temperaturdifferenz innerhalb des Baufelds beträgt 3,3 K. Der Einsatz des zuvor beschriebenen Profils - in Abhängigkeit der y-Position des IR-Strahlers - kompensiert diese Unterschiede nahezu vollständig

(b). Hier liegen die maximalen Temperaturunterschiede bei 1,2 K. Die Reduktion der Strahlerleistung über die Schichtzahl bewirkt ein geringeres Temperaturniveau während der Druckphase.

Die beschriebenen Unterschiede in der Temperaturverteilung während dem Drucken der Prüfkörper zeichnen sich auch bei der Quantifizierung der Qualitätsmerkmale ab. Exemplarisch hierfür stellt Diagramm 4 die Festigkeiten der Scheibenprüfkörper des nicht kompensierten und des kompensierten Jobs gegenüber.

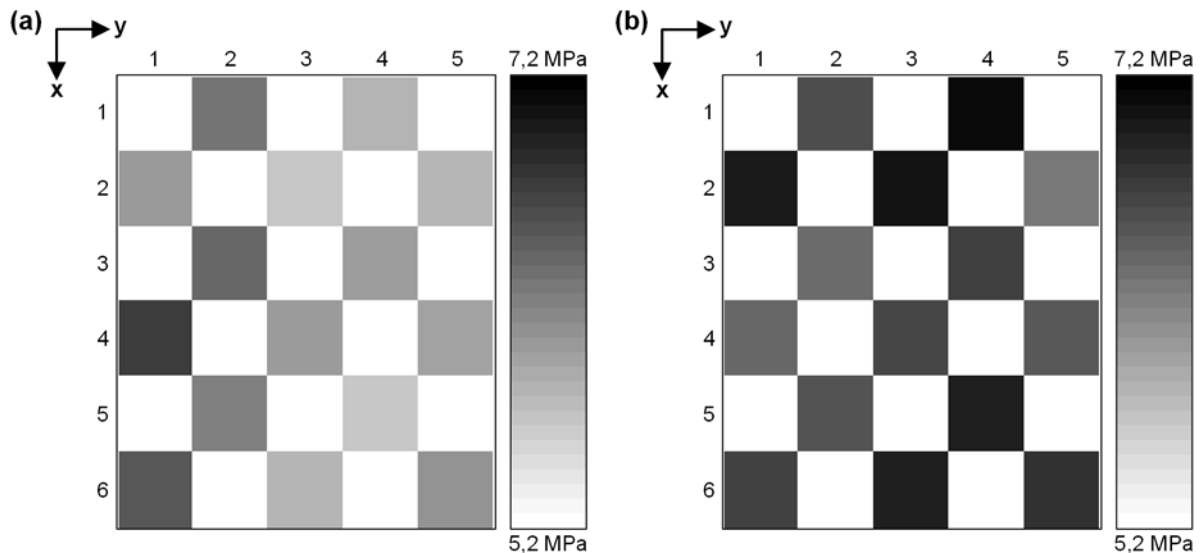


Diagramm 4: Festigkeitsverteilung eines nicht-temperaturkompensierten (a) und eines temperaturkompensierten (b) Jobs

Die Temperaturinhomogenitäten beim Drucken der Scheibenprüfkörper spiegeln sich auch in der Festigkeitsverteilung wider. Erfolgt keine Kompensation (a) lässt sich ein Bereich höherer Festigkeit (y-Spalten 1 und 2) und ein Bereich verminderter Festigkeit (y-Spalten 3, 4 und 5) feststellen. Erfolgt die Kompensation, liegen die Festigkeiten gleichmäßig über das gesamte Baufeld verteilt vor.

6.5.2 Einflüsse der Druckkopfstabilität

Neben der Steuerung des Energieeintrags, ist ein prozesssicherer Fluideintrag von größter Bedeutung für die Herstellung aussagekräftiger Prüfkörper. Wie stark ein instabil arbeitender Druckkopf die Prüfkorpereigenschaften beeinflusst, gibt Diagramm 5 wieder. Dargestellt ist die Festigkeitsverteilung von jeweils 15 Scheibenprüfkörpern bei einem instabil und stabil arbeitenden Druckkopf.

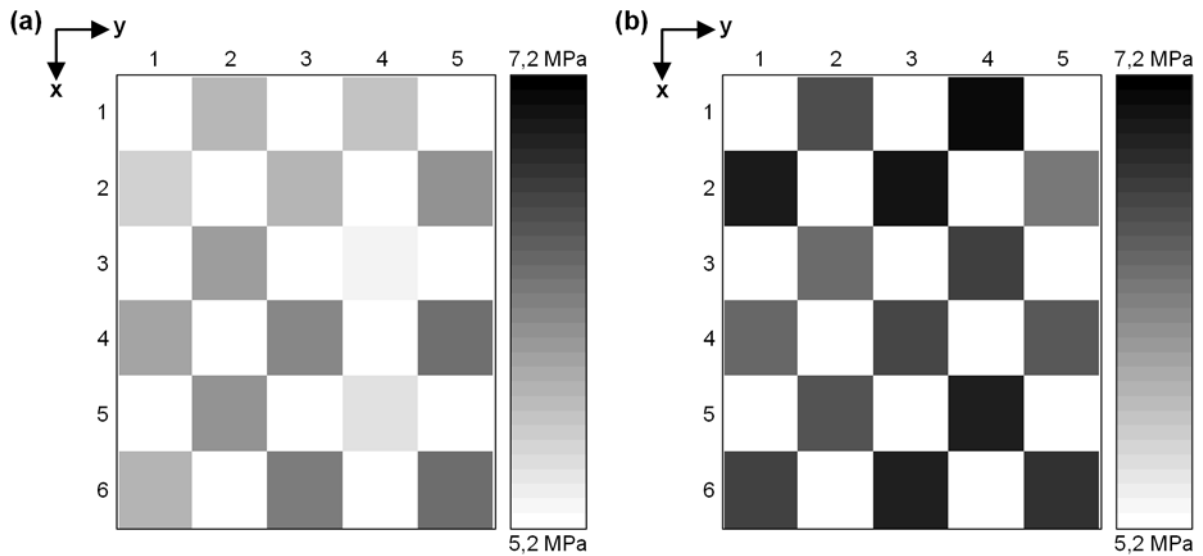


Diagramm 5: Festigkeitsverteilung von einem Job mit einem instabil (a) und einem stabil (b) arbeitenden Druckkopf

Im Falle des instabil arbeitenden Druckkopfs kam es durch fehlerhafte Einstellungen der Reinigungswalze zu einer Abnahme der Topfenmassen. Der Ausfall einzelner Düsen während des Drucks der Prüfkörper äußert sich optisch durch ein streifiges Druckbild. Bei der Bestimmung der Festigkeit bedingt die Druckkopfstabilität ein Absinken der mittleren Festigkeit von 6,71 auf 5,89 MPa. Ebenso steigt die Streuung der Festigkeiten. Dies spiegelt sich in einer Zunahme der Standardabweichung von 0,86 auf 1,05 MPa wider.

6.5.3 Charakterisierung des Referenzjobs

Mit den zuvor beschriebenen Maßnahmen konnte eine hinreichende Homogenität der Prozess- und Prüfkorpereigenschaften innerhalb eines Druckjobs erreicht werden. Bevor einzelne Faktoren variiert werden können, muss zusätzlich zur Baufeldhomogenität die Reproduzierbarkeit sichergestellt werden. Der folgende Abschnitt stellt die Hauptergebnisse von sieben Referenzjobs, die im Laufe der Hauptversuchsreihen durchgeführt wurden, dar. Diese Referenzjobs wurden mit identischen Faktoreinstellungen durchgeführt. Die Darstellung gliedert sich nach dem Probenotyp (Scheiben- bzw. Ringprüfkörper). Die Skalierung der Ordinaten orientiert sich an den minimal bzw. maximal gemessenen Werten der jeweiligen Ergebnisse und wird bei der Darstellung der Ergebnisse konstant gehalten. Diagramm 6 zeigt die Hauptergebnisse der Prozessüberwachung bzw. der Charakterisierung der Scheibenprüfkörper mit jeweiliger Standardabweichung.

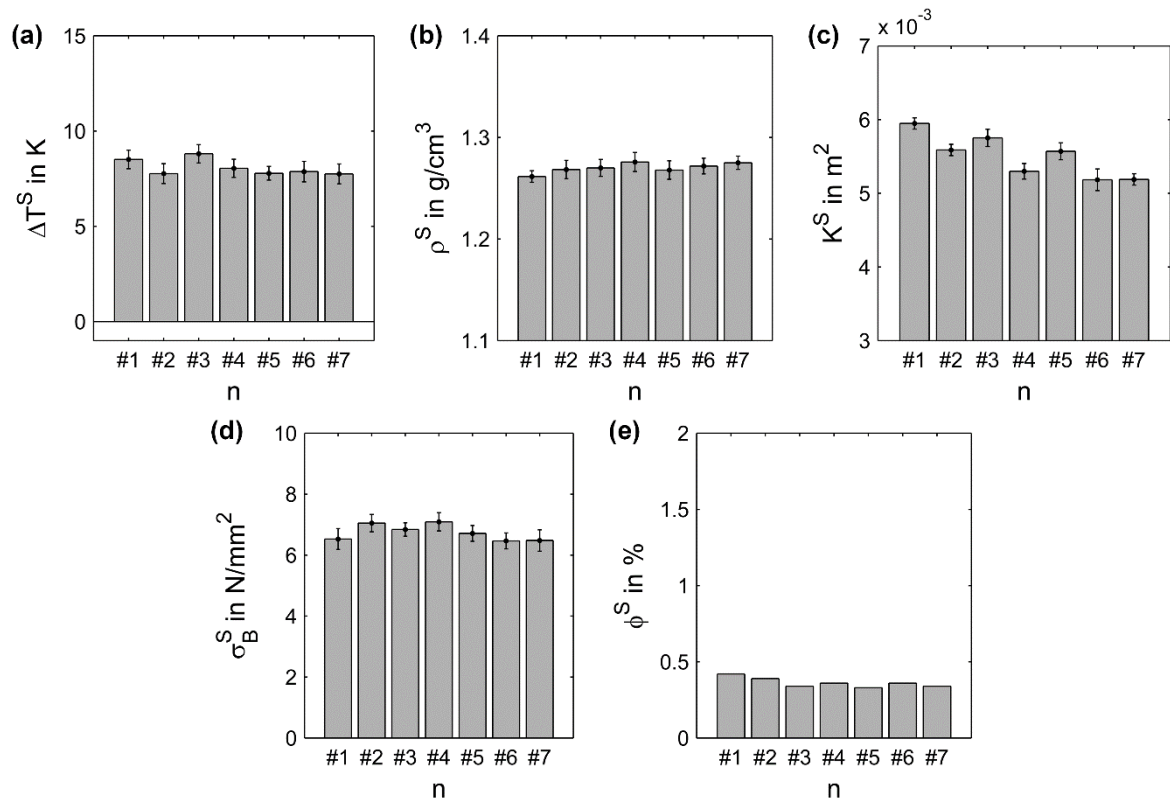


Diagramm 6: Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) der Scheibenprüfkörper für sieben Referenzjobs

Die mittleren Prozesstemperaturen der Scheibenprüfkörper ΔT^S bewegen sich im Bereich um 7,8 K. Die Dichte ρ^S liegt nahezu konstant auf einem Niveau von 1,27 g/cm³. Größere Schwankungen waren bei der Bestimmung der Permeabilität K^S zu beobachten. Hier liegen die Messwerte für die Referenzjobs zwischen 5,18 und 5,95 $\times 10^{-3}$ m². Die Bruchfestigkeit σ_B^S der Scheibenprüfkörper beträgt zwischen 6,47 und 7,09 MPa. Die Probenfeuchte ϕ^S liegt in einem Bereich zwischen 0,33% und 0,42%.

An den Ringprüfkörpern werden neben der mittleren Prozesstemperatur ΔT^R die Hauptergebnisse Curlneigung C^R , Fluidmigration Δm_F^R und Abrieb Δm_A^R quantifiziert. Diagramm 7 zeigt die Ergebnisse der sieben durchgeführten Referenzjobs.

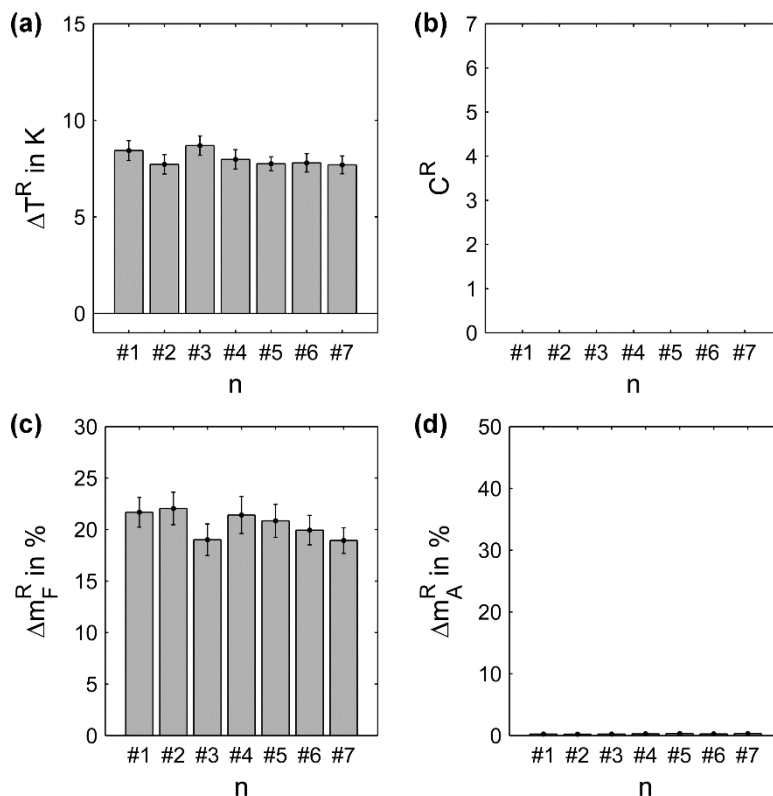


Diagramm 7: Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) der Ringprüfkörper für sieben Referenzjobs

Die mittleren Prozesstemperaturen der Ringprüfkörper bewegen sich im Bereich um 7,7 K. Curl tritt in keinem der Referenzjobs auf. Die gemessene Fluidmigration bei identischen Faktoreinstellungen liegt zwischen 18,9% und 22,1%. Abrieb tritt bei diesen Faktoreinstellungen nur in sehr geringem Maße auf. Hier liegen die Werte zwischen 0,22% und 0,33%.

Neben der Quantifizierung der Qualitätsmerkmale erfolgte ebenfalls eine qualitative Bewertung der Prüfkörper, die mit Referenzeinstellungen hergestellt wurden. Das optische Erscheinungsbild eines Scheiben- und eines Ringprüfkörpers wurde bereits in Abbildung 11 bzw. Abbildung 13 dargestellt. Die Prüfkörper weisen mittelmäßig starke Anhaftungen auf und haben eine ausreichend hohe Festigkeit, um problemloses Finishing und Handling zu ermöglichen. Abbildung 17 zeigt zwei REM Aufnahmen, die an der Bruchfläche eines Scheibenprüfkörpers aufgenommen wurden.

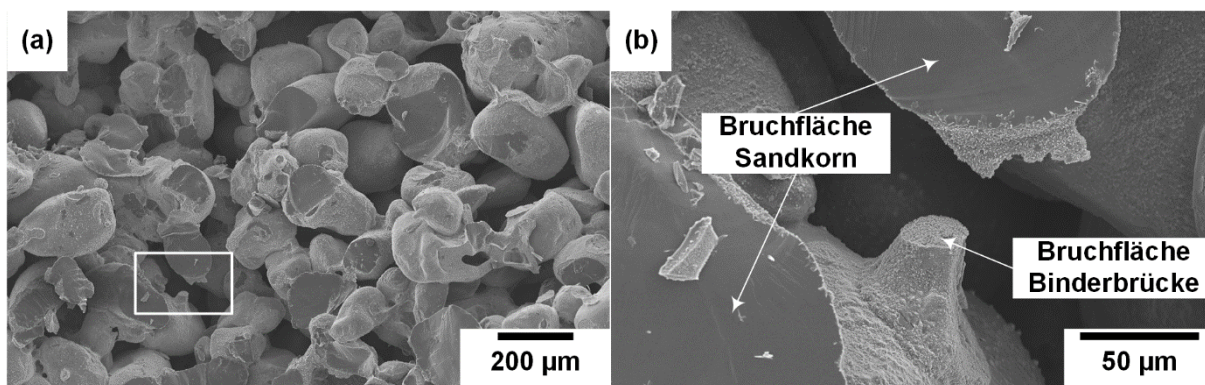


Abbildung 17: REM Aufnahmen der Bruchfläche eines mit Referenzeinstellungen hergestellten Scheibenprüfkörpers (a) und Detail einer Sandkornbruchfläche und einer gebrochenen Binderbrücke (b)

Die Übersichtsaufnahme zeigt eine Vielzahl von Sandkörnern, die mit Binder ummantelt sind. Die Binderoberfläche weist eine feine Oberflächenrauheit auf. An Kontaktpunkten zwischen zwei Sandkörnern bilden sich miniskusförmige Binderbrücken aus. Bruchflächen sind sowohl innerhalb von Sandkörnern, an den Grenzflächen zwischen Sandkörnern und Binderbrücken als auch innerhalb von Binderbrücken entstanden. Die Detailaufnahme (b) des in (a) gekennzeichneten Bereichs zeigt die glatten Bruchflächen zweier durchtrennter Sandkörner sowie die raue Bruchfläche innerhalb einer Binderbrücke.

6.6 AP 6: Weiterführung Parametervariation mit erweiterten Sandprüfmethoden (utg)

Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Ergebnisse der Referenzjobs bilden den Ausgangspunkt für sämtliche Faktorenvariationen. Die folgenden Unterabschnitte legen die gewonnenen Ergebnisse dieser Faktorenvariationen dar. Die Darstellung gliedert sich jeweils in die Quantifizierung der Hauptergebnisse und in die qualitative Bewertung. Aufgrund des begrenzten Umfangs dieses Abschlussberichts sei für die Interpretation der gewonnenen Ergebnisse auf die Dissertation von Hrn. Ramakrishnan (vgl. AP 13) verwiesen. Bei der Darstellung der Ergebnisse wird eine einheitliche Skalierung, die sich an den globalen Minima und Maxima orientiert, gewählt. Dies erleichtert die Vergleichbarkeit der Einflüsse der verschiedenen Faktoren auf die untersuchten Qualitätsmerkmale. Im Rahmen der qualitativen Bewertung wird nur auf die Faktoren eingegangen, bei denen qualitative Unterschiede zu den Referenzproben festgestellt werden konnten. Konkret sind das die Faktoren Binderkonzentration, Fluideintrag und Energieeintrag.

6.6.1 Binderkonzentration

Ausgehend von der Binderkonzentration des Referenzjobs von 10% ($n = 7$), erfolgten Versuche mit 5% ($n = 3$), 7,5% ($n = 2$) sowie 12,5% ($n = 2$) und 15% ($n = 3$) Bindergehalt. Diagramm 8 stellt die Hauptergebnisse dar, die aus den Scheibenprüfkörpern der 17 Jobs dieser Versuchsreihe gewonnenen wurden.

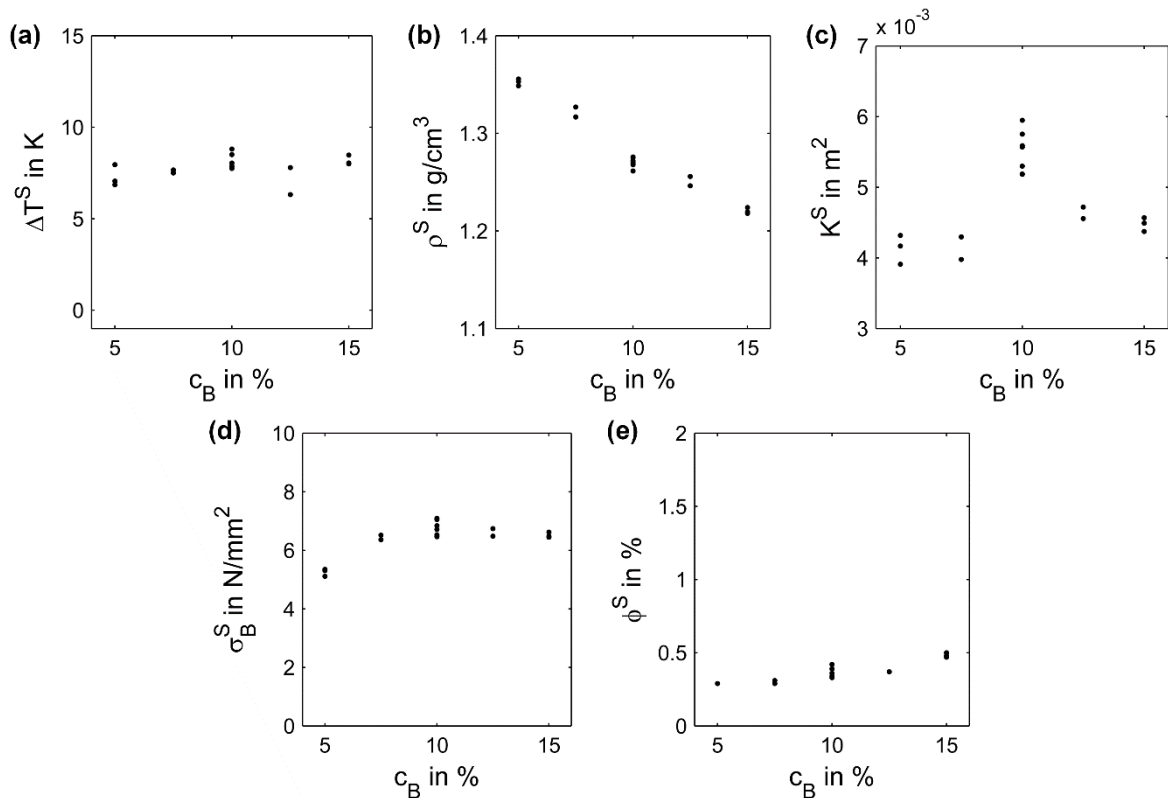


Diagramm 8: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit der Binderkonzentration

Die Prozesstemperatur der Scheibenprüfkörper schwankt zwischen 6,3 und 8,8 K und zeigt keine Abhängigkeit von der Binderkonzentration. Die Dichte der Scheibenprüfkörper hingegen zeigt hier eine eindeutige Abhängigkeit. Die höchste Dichte (maximal $1,36 \text{ g/cm}^3$) weisen Proben auf, die mit einer Binderkonzentration von 5% hergestellt wurden. Mit zunehmender Binderkonzentration nimmt die Dichte ab. Proben mit einer Binderkonzentration von 15% haben eine Dichte von minimal $1,22 \text{ g/cm}^3$. Sowohl bei einer Verminderung als auch bei einer Steigerung des Bindergehalts, nimmt die Permeabilität ab. Hier kommt es innerhalb der Messreihen gleicher Binderkonzentration zu erheblichen Schwankungen der Messwerte. Die Festigkeit zeigt ausgehend von minimal $5,11 \text{ MPa}$ bei einer Binderkonzentration von 5% zunächst einen Anstieg auf maximal $7,09 \text{ MPa}$ bei 10% Binderkonzentration. Zwischen 10% und 15% ist ein leichter Abfall auf minimal $6,45 \text{ MPa}$ zu verzeichnen. Der Feuchtegehalt steigt von $0,29\%$ bei 5% Binderkonzentration bis auf maximal $0,57\%$ bei 15% Binderkonzentration an.

Diagramm 9 stellt die aus den Ringprüfkörpern gewonnenen Hauptergebnisse dar.

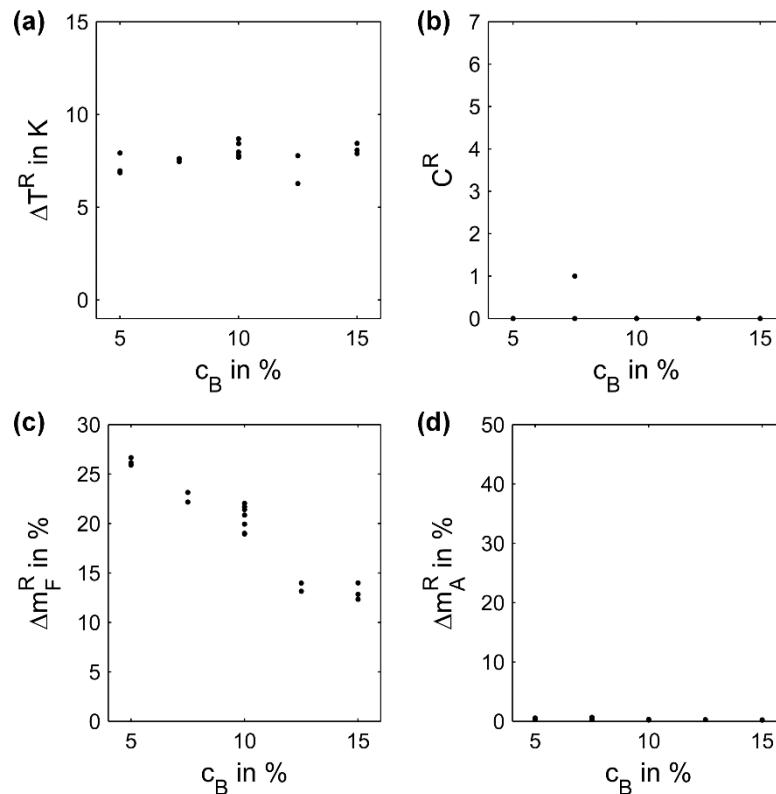


Diagramm 9: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit der Binderkonzentration

Wie bereits bei den Scheibenprüfkörpern zeigt auch die Prozesstemperatur der Ringprüfkörper keine Abhängigkeit von der Binderkonzentration. Sie schwankt zwischen 6,3 und 8,7 K. Curl konnte lediglich bei einer einzigen Probe eines Job, der mit einer Binderkonzentration von 7,5% hergestellt wurde, beobachtet werden. Die Fluidmigration zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Binderkonzentration. Bei 5% Binderanteil erreicht die Fluidmigration maximal Werte von 26,66%. Mit zunehmendem Binderanteil nimmt die Fluidmigration ab und erreicht bei einem Binderanteil von 15% Werte von minimal 12,34%. Sämtliche Versuche dieser Reihe zeigen geringen Abrieb. Bei niedrigeren Bindergehalten ist ein leichter Anstieg auf maximal 0,67% zu verzeichnen.

Die qualitativen Auswirkungen der Bindergehaltsvariation lassen sich anhand der Extrema dieser Versuchsreihe aufzeigen. Proben, mit einer Binderkonzentration von 5%, weisen ein hohes Maß an Anhaftungen auf. Die Stegzwischenräume der Ringprüfkörper sind nahezu vollständig mit anhaftendem Formstoff gefüllt (vgl. Abbildung 13 (d)). Dementsprechend erfordern die Scheibenprüfkörper erheblichen Finishingaufwand, um die Sollhöhe von 10 mm zu erreichen. Die mechanische Festigkeit ist hoch genug, um ein problemloses Handling zu ermöglichen. Abbildung 18 zeigt REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenproben, die mit 5% und mit 15% Binderkonzentration hergestellt wurden in jeweils zwei unterschiedlichen Vergrößerungen.

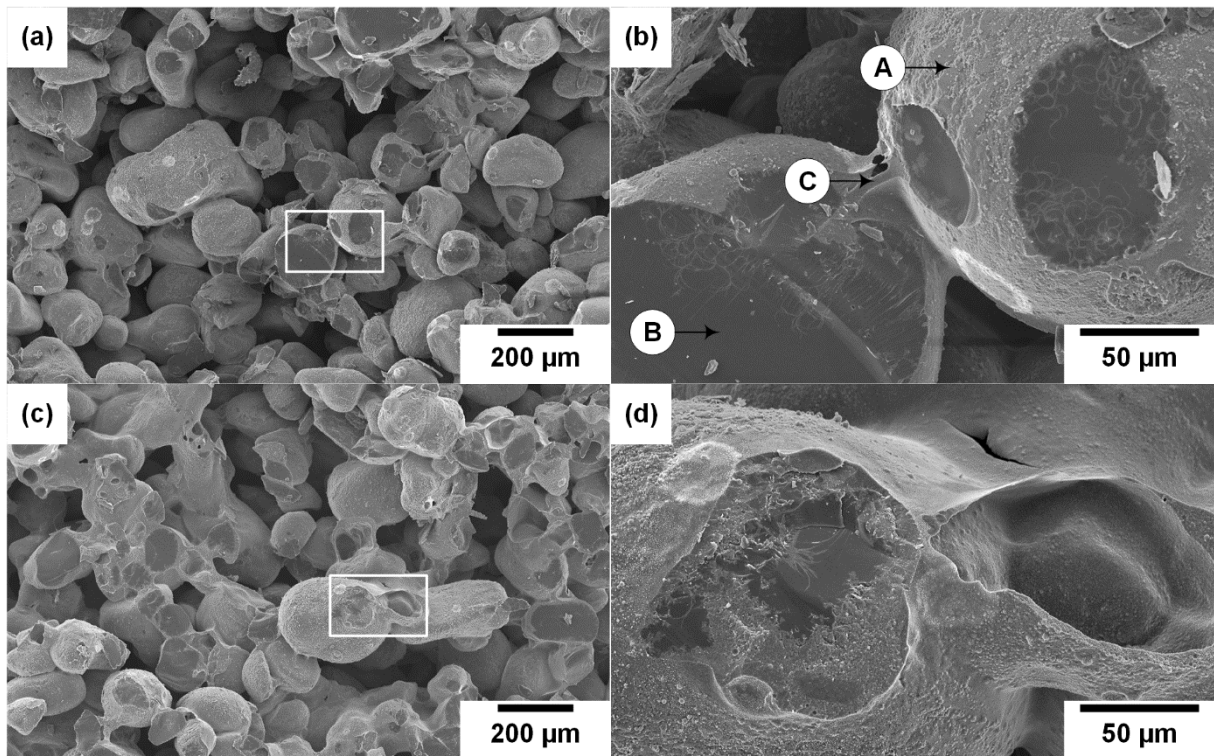


Abbildung 18: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern mit 5% (a) und (b) sowie mit 15% (c) und (d) Binderkonzentration. Die Markierungen A, B und C in Ausschnitt (b) geben die Positionen der EDX Analysen wieder.

Beide Übersichtsaufnahmen ((a) und (c)) zeigen ein gemischtes Bruchbild, in dem die Materialtrennung sowohl durch Sandpartikel als auch durch Binderbrücken hindurch stattgefunden hat. Der um 10% höhere Anteil an Binder in (c) ist anhand der Dicke der Binderbrücken deutlich zu erkennen. Die Detailaufnahmen ((b) und (d)) zeigen charakteristische Ausschnitte, in denen die unterschiedliche Ausprägung der Brückenmorphologie sichtbar ist. Bei 5% Bindergehalt bilden sich schmale Binderbrücken zwischen den Sandkörnern aus. Bei einem Gehalt von 15% werden die Sandkörner von der Bindermatrix eingebettet. Die verschiedenen Bruchflächen und Oberflächen lassen sich ebenfalls qualitativ in einer EDX Analyse unterscheiden. Diese wurde exemplarisch an den mit A, B und C gekennzeichneten Bereichen des Bildausschnitts (b) durchgeführt (Ergebnisse und Interpretation siehe Dissertation Hr. Ramakrishnan).

6.6.2 Fluideintrag

Ausgehend von den Einstellungen des Referenzjobs mit einem Fluideintrag von 10% (n = 7) erfolgten Versuche mit 5% (n = 3), 6% (n = 1), 8% (n = 1) sowie 12% (n = 1) und 15% (n = 3) Fluideintrag. Diagramm 10 stellt die Erkenntnisse dar, die aus den Scheibenprüfkörpern gewonnenen wurden.

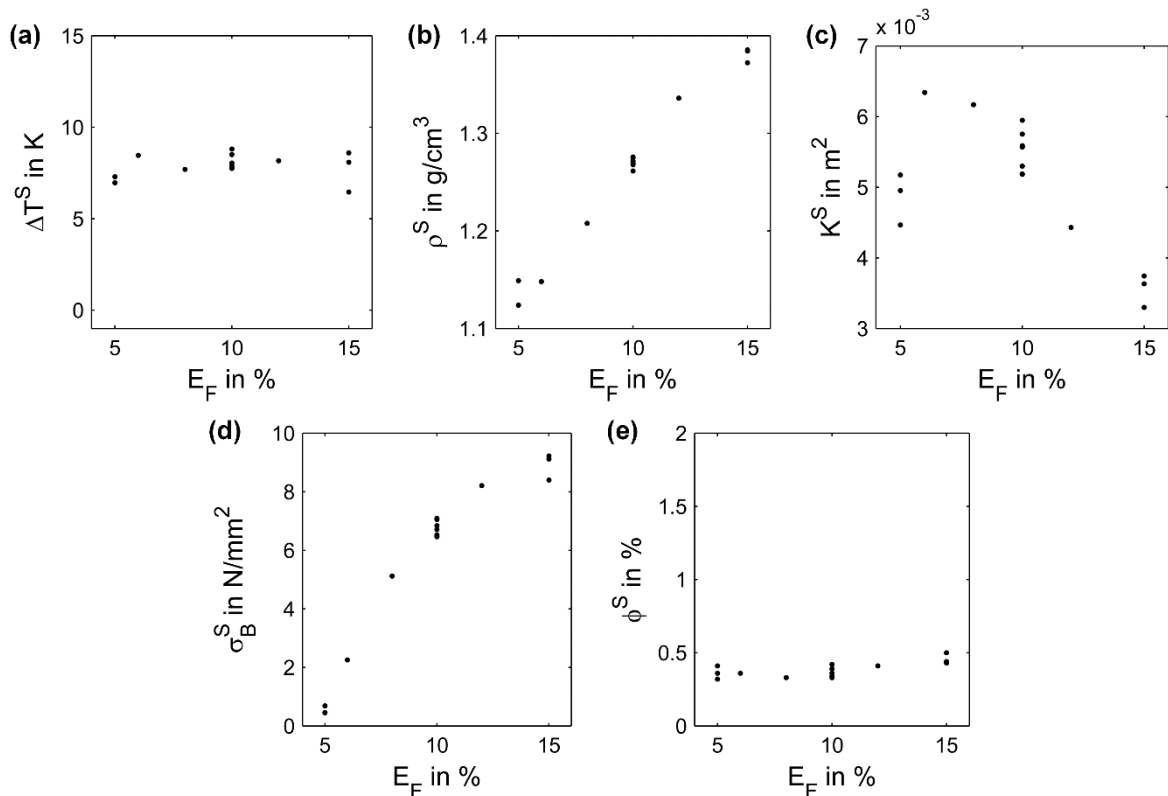


Diagramm 10: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit des Fluideintrags

Die Prozesstemperaturen der Scheibenprüfkörper schwanken zwischen 6,5 und 8,8 K und zeigen keine eindeutige Abhängigkeit vom Fluideintrag. Eine ausgeprägte Abhängigkeit ist wiederum beim Qualitätsmerkmal Dichte zu erkennen: Hier steigt die Dichte von minimal 1,12 g/cm³ bei einem Fluideintrag von 5% bis auf einen Wert von maximal 1,39 g/cm³ bei 15% Fluideintrag. Trotz der erneut starken Streuung der Permeabilitäten ist auch hier eine Abhängigkeit zu erkennen. Die größte Permeabilität ($6,34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$) tritt bei einem Fluideintrag von 6% auf. Bei Erhöhung des Fluideintrags auf 15% nimmt die Permeabilität bis minimal $3,30 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ab. Wird der Fluideintrag auf 5% verringert, so kommt es ebenfalls zu einer Abnahme der Permeabilität. Die Festigkeit der Scheibenprüfkörper hängt ebenfalls in großem Maße von dem Fluideintrag ab. Bei einem Fluideintrag von 5% treten Festigkeiten von minimal 0,45 MPa auf. Mit zunehmendem Fluideintrag nehmen die Festigkeiten stark zu. Im Bereich höherer Fluideinträge flacht diese Zunahme etwas ab und die Festigkeit erreicht einen Wert von maximal 9,22 MPa. Die untersuchten Proben weisen einen Feuchtegehalt zwischen 0,32% und 0,50% auf, wobei ein leichter Anstieg des Feuchtegehalts sowohl bei geringen als auch bei hohen Fluideinträgen zu verzeichnen ist.

Diagramm 11 stellt die aus den Ringprüfkörpern gewonnenen Hauptergebnisse dar.

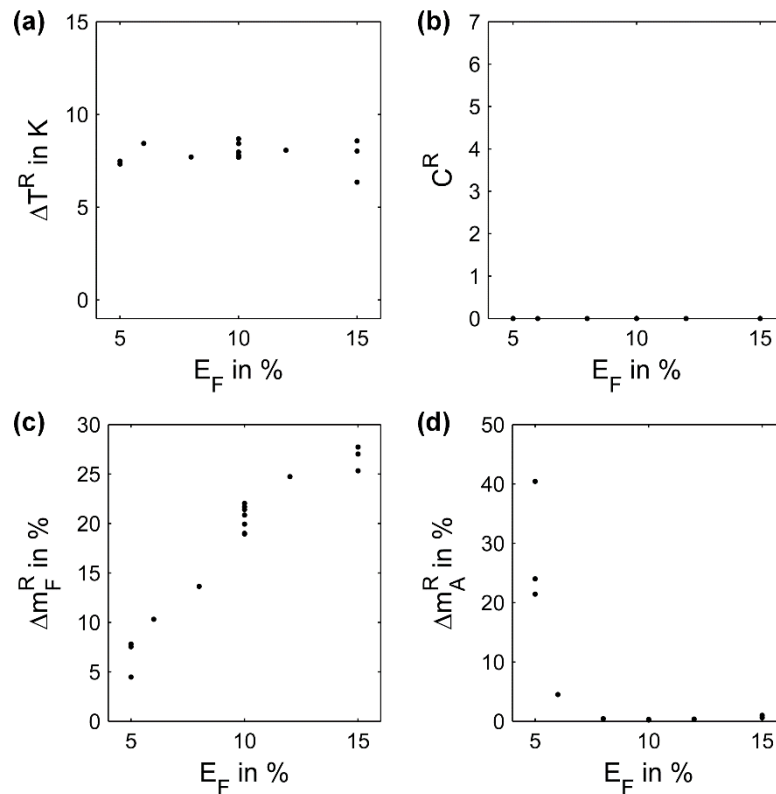


Diagramm 11: Darstellung der Haupteigenschaften Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit des Fluideintrags

Das Verhalten der Prozesstemperaturen der Ringprüfkörper gleicht dem der Scheibenprüfkörper. Curl tritt unabhängig vom Fluideintrag nicht auf. Die Fluidmigration zeigt hingegen eine sehr deutliche Abhängigkeit von der Menge an eingetragenen Fluid. Ein Fluideintrag von 5% führt zu Fluidmigration von minimal 4,48%. Mit steigender Menge an eingetragenen Fluid steigt auch die Fluidmigration an. Maximal werden Werte von 27,73% bei einem Fluideintrag von 15% erreicht. In Bezug auf das Haupteergebnis Abrieb zeigt sich ebenfalls eine sehr starke Relation. Fluideinträge zwischen 8% und 15% führen zu Abriebwerten zwischen 0,22% und 1,01%. Bei einem Fluideintrag von 6% tritt bereits deutlich verstärkter Abrieb auf. Bei weiterer Verminderung des Fluideintrags kommt es zu sehr starkem Abrieb der Ringprüfkörper mit Werten von maximal 40,43%.

Der starke Einfluss des Faktors Fluideintrag auf die Qualitätsmerkmale der Probekörper spiegelt sich ebenfalls bei der qualitativen Bewertung wider. Proben, die mit einem Fluideintrag von 5% hergestellt wurden, weisen eine äußerst geringe mechanische Stabilität auf. Demzufolge kommt es hier beim Finishing und Prüfen zu unvermeidbaren leichten Beschädigungen an den Proben in Form von abgeriebenen Sandpartikeln und kleineren Kantenausbrüchen. Prüfkörper, die mit einem Fluideintrag von 15% gebaut wurden, zeigen ein gegenteiliges Bild. Sie weisen ein hohes Maß an Anhaftungen auf und die Scheibenprüfkörper können aufgrund ihrer hohen mechanischen Stabilität nur mit sehr großem mechanischem Aufwand gefinished werden. Abbildung 19 zeigt REM Aufnahmen der Bruchflächen von den Scheibenproben, die mit 5% und mit 15% Fluideintrag hergestellt wurden.

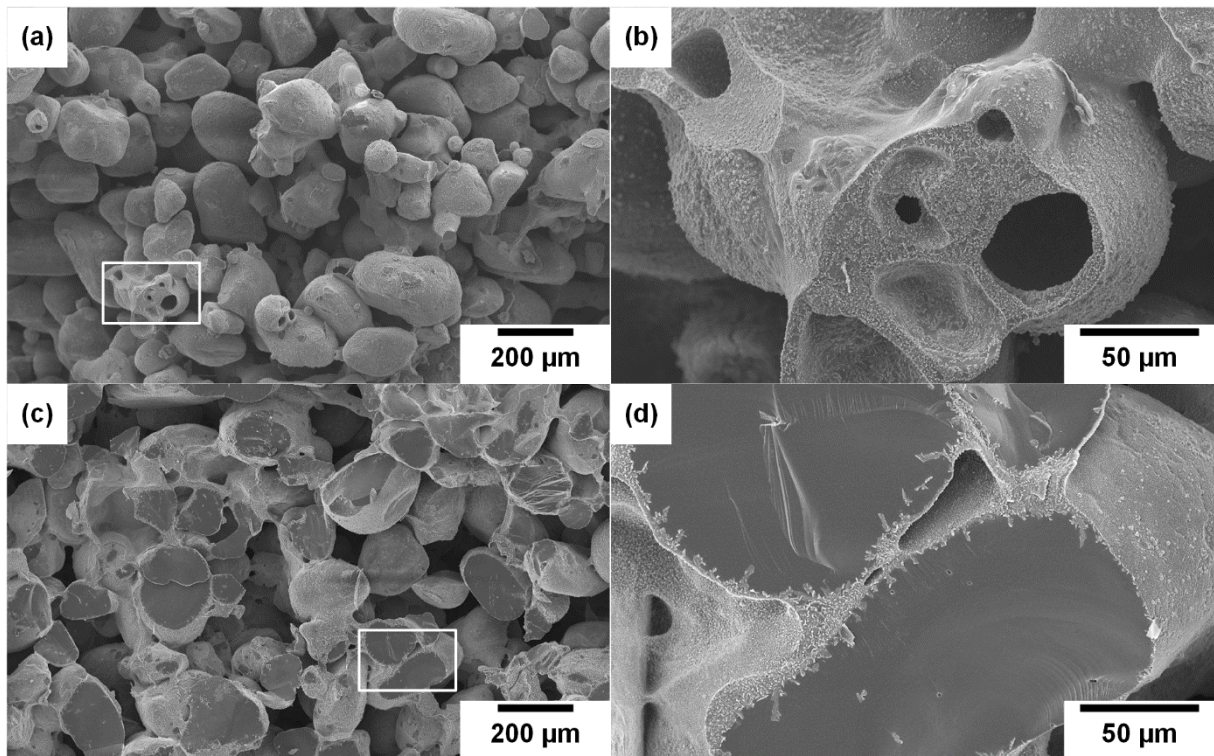


Abbildung 19: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern mit 5% (a) und (b) sowie 15% (c) und (d) Fluideintrag

Die Übersichtsaufnahmen ((a) und (c)) zeigen ein deutlich unterschiedliches Bruchbild: Bei der 5%-igen Probe kommt es ausschließlich zum Versagen innerhalb der Binderbrücken. Auf der Bruchoberfläche sind zudem Binderpartikel zu erkennen, die noch ihre Ausgangsmorphologie besitzen und keine Brücken ausgebildet haben. In der Detailaufnahme der identischen Probe (b) ist zu erkennen, dass die ausgebildeten Binderbrücken teilweise innenliegende Hohlräume aufweisen. Die Übersichtsaufnahme der Probe, die mit einem Fluideintrag von 15% hergestellt wurde (c), offenbart eine Bruchfläche, in der eine große Anzahl gebrochener Sandkörner zu sehen ist. Der Detailausschnitt (d) zeigt deutlich, wie die Rissebene Sandpartikel und Binderbrücken auf gleicher Höhe schneidet.

6.6.3 Energieeintrag

Die Referenzjobs ($n = 7$) wurden mit einem Energieeintrag von 4,337 kJ pro Schicht durchgeführt. Weitere Versuche erfolgten mit 0 ($n = 3$), 1,835 ($n = 1$), 7,280 ($n = 1$) und 11,205 kJ ($n = 3$) Energieeintrag. Diagramm 12 illustriert die Ergebnisse, die aus den Scheibenprüfkörpern gewonnen werden konnten.

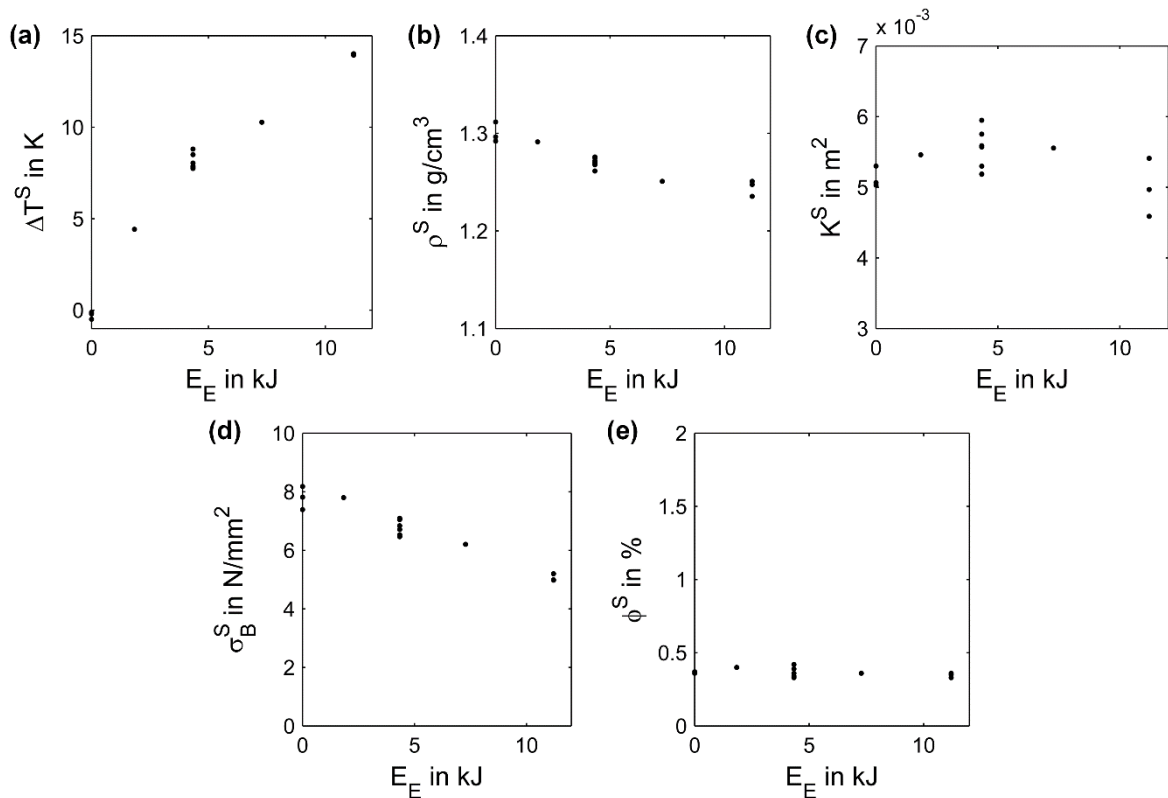


Diagramm 12: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit des Energieeintrags

Die Prozesstemperatur zeigt eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Energieeintrag. Bei deaktiviertem IR-Strahler tritt eine Abkühlung von bis zu 0,5 K auf. Mit steigendem Energieeintrag, also steigender Strahlerleistung, nimmt die Prozesstemperatur deutlich zu. Maximal wird der Wert von 14,0 K bei einem Energieeintrag von 11,205 kJ erreicht. Die Dichte der Proben fällt mit zunehmendem Energieeintrag. Ohne Prozessheizung erreicht sie maximal 1,31 g/cm^3 . Bei maximalem Energieeintrag von 11,205 kJ reduziert sich die Dichte auf minimal 1,24 g/cm^3 . In Bezug auf die Permeabilität der Scheibenprüfkörper treten bei Referenzeinstellungen die höchsten Werte auf. Sowohl bei Verringerung als auch bei Steigerung des Energieeintrags, kommt es zu einer verminderten Permeabilität von minimal $5,03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ bzw. $4,59 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Die Festigkeit der Scheibenprüfkörper zeigt einen eindeutigen Zusammenhang mit der eingebrachten Energie. Bei deaktivierten IR-Strahler treten maximale Festigkeiten von 8,18 MPa auf. Diese reduzieren sich mit zunehmendem Energieeintrag. Bei maximalem Energieeintrag beträgt die Festigkeit minimal 4,98 MPa. In Bezug auf den Feuchtegehalt der Proben lässt sich keine eindeutige Abhängigkeit feststellen. Sie schwankt zwischen Werten von 0,33% und 0,42%.

Diagramm 13 veranschaulicht die Hauptergebnisse der Ringprüfkörper.

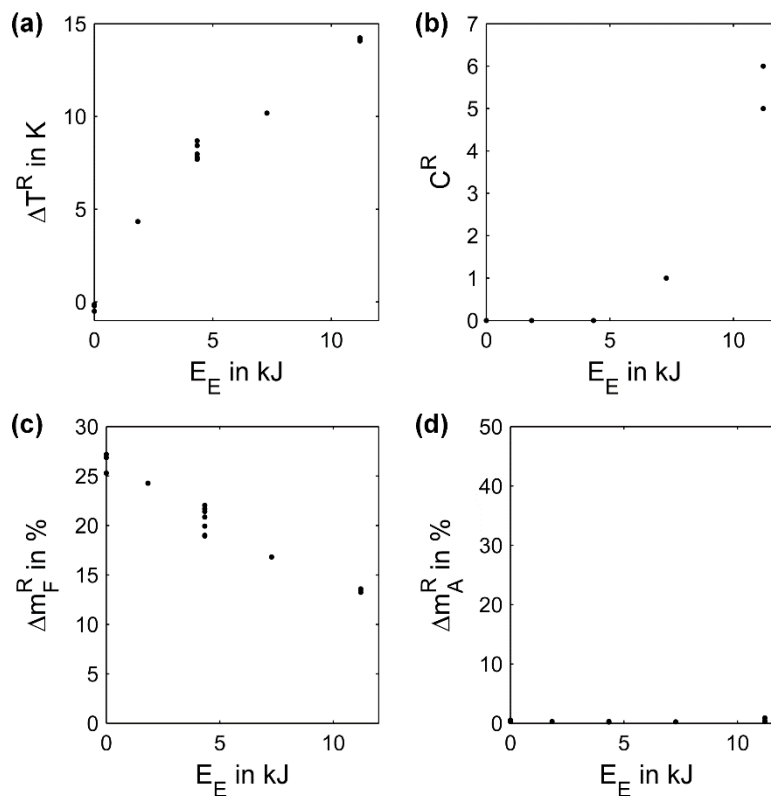


Diagramm 13: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit des Energieeintrags

Die Prozesstemperatur verhält sich nahezu identisch wie bei den Scheibenproben. Hier werden Werte von minimal -0,5 K und maximal 14,2 K erreicht. Der Faktor Energieeintrag hat einen deutlichen Einfluss auf die Curlneigung der hergestellten Prüfkörper. Bei Referenzeinstellungen bzw. vermindertem Energieeintrag tritt kein Curl auf. Mit höherem Energieeintrag nimmt die Curlneigung deutlich zu. Bei maximalem Energieeintrag kommt es bei 5 bzw. 6 der 15 Prüfkörper eines Jobs zum Auftreten von Curl. Die Fluidmigration lässt sich ebenfalls durch den Energieeintrag beeinflussen. Sie fällt von maximal 27,19% bei deaktiviertem Strahler auf minimal 13,25% bei maximaler Strahlerleistung ab. Der Abrieb der Proben ist über die gesamte Versuchsreihe hinweg gering und zeigt eine leicht steigende Tendenz in Richtung höherer Energieeinträge.

Die bei der Quantifizierung der Hauptergebnisse gewonnenen Erkenntnisse zeichnen sich auch bei der qualitativen Bewertung von Prüfkörpern, die mit einem Energieeintrag von 0 J bzw. 11,205 kJ hergestellt wurden, ab. Ein deaktivierter IR-Strahler resultiert in Prüfkörpern von hoher Festigkeit, die ausgeprägte Anhaftungen aufweisen. Die Menge an Anhaftungen und der Finishingaufwand von Prüfkörpern, die mit maximalem Energieeintrag gebaut wurden, ist deutlich geringer. Abbildung 20 zeigt REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenproben, die mit 0 J und 11,205 kJ Energieeintrag hergestellt wurden.

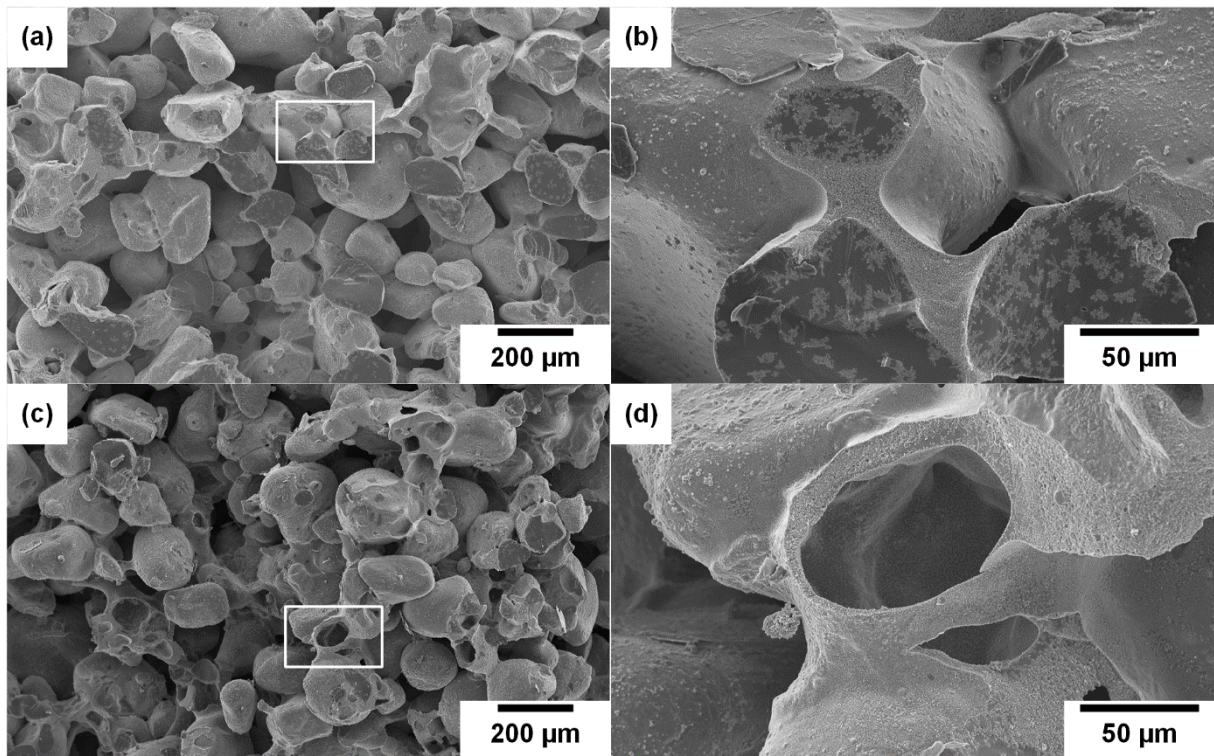


Abbildung 20: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern mit 0 J (a) und (b) sowie 11,205 kJ (c) und (d) Energieeintrag

Die Übersichtsaufnahmen ((a) und (c)) zeigen in beiden Fällen sowohl gebrochene Sandpartikel als auch durchtrennte Binderbrücken. Der Anteil gebrochener Sandkörner ist jedoch bei (a) deutlich höher. Die Probenherstellung ohne Einsatz des IR-Strahlers resultiert in einer glatteren Binderbrückenmorphologie. Dies kann in den Detailaufnahmen ((b) und (d)) erkannt werden. Hier zeigt die Probe aus dem Versuch mit maximalem Energieeintrag eine raue und zerklüftete Ausprägung der Binderbrücken.

6.6.4 Zykluszeit

Der Referenzjob ($n = 7$) hat eine Wartezeit von 3 s, die der Vorglühdauer des IR-Strahlers entspricht. Daraus ergibt sich die Referenzzykluszeit zu 72 s. Im Rahmen dieser Versuchsreihe erfolgten zwei weitere Versuche. Zum einen wurde bei konstanter Strahlerleistung von 4,337 kJ die Zykluszeit auf 192 s verlängert. In einem weiteren Versuch wurde sie ebenfalls auf 192 s verlängert, wobei der IR-Strahler deaktiviert wurde. Zum Vergleich sind in den folgenden Abbildungen erneut die Ergebnisse der Jobs mit deaktiviertem IR-Strahler bei einer Zykluszeit von 3 s ($n = 3$) aufgetragen. Diagramm 14 illustriert die Ergebnisse, die aus den Scheibenprüfkörpern gewonnen werden konnten.

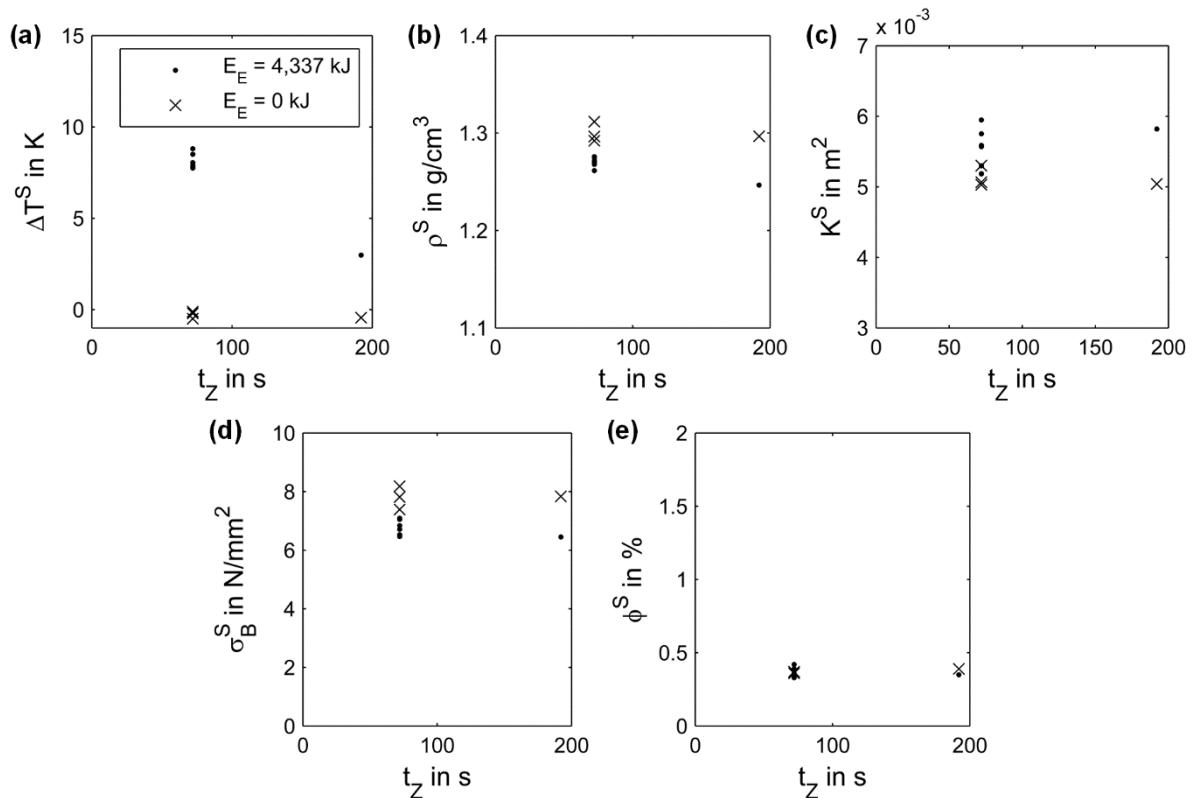


Diagramm 14: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit der Zykluszeit

Im Falle des Versuchs mit einem Energieeintrag von 4,337 kJ (Referenzeinstellung) zeigt sich mit einer Erhöhung der Zykluszeit um 120 s eine Abnahme der Prozesstemperatur von maximal 8,8 K auf 3,0 K. Bei deaktiviertem IR-Strahler zeigt sich keine Abhängigkeit von der Zykluszeit. Bei aktivem IR-Strahler verringert sich die Dichte leicht von 1,28 auf 1,25 g/cm³ mit einer Steigerung der Zykluszeit. Bei inaktivem Strahler konnte keine Veränderung gemessen werden. Ähnlich verhalten sich die Qualitätsmerkmale Permeabilität, Festigkeit und Feuchtegehalt. Bei diesen drei Ergebnisgrößen konnte weder mit aktivem noch mit inaktivem IR-Strahler eine Abhängigkeit von dem Faktor Zykluszeit festgestellt werden.

Diagramm 15 veranschaulicht die Hauptergebnisse der Ringprüfkörper, die im Rahmen dieser Versuchsreihe gewonnen wurden.

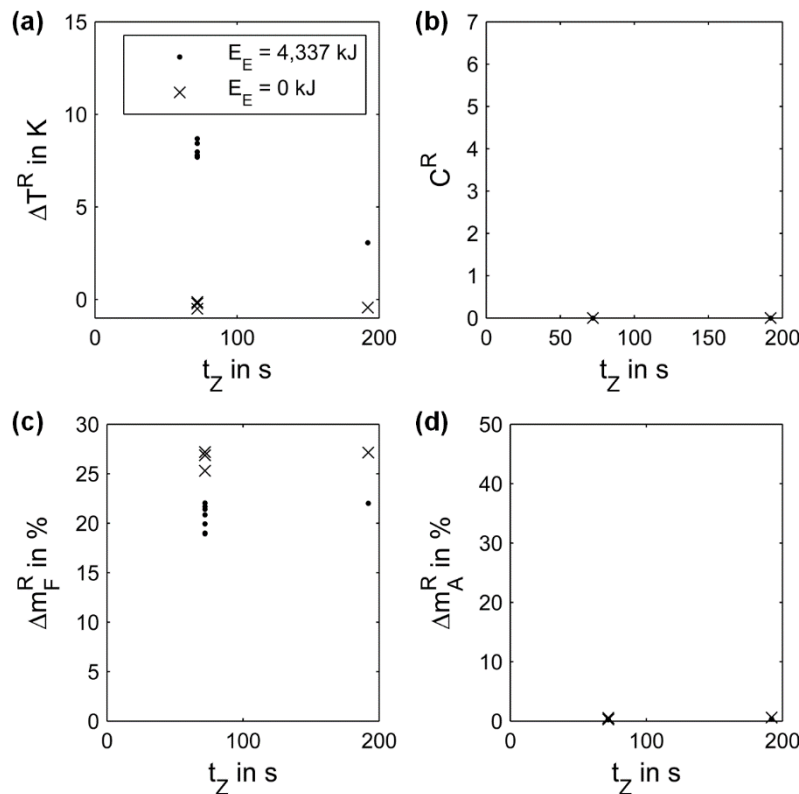


Diagramm 15: Darstellung der Hauptergebnisse Prozess Temperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit der Zykluszeit

Die Charakterisierung der Ringprüfkörper liefert ähnliche Erkenntnisse wie die der Scheibenprüfkörper. Die Prozess-Temperatur zeigt eine eindeutige Abhängigkeit von der Zykluszeit. Eine Zunahme der Zykluszeit führt zu einer Abnahme der Prozess-Temperatur im Falle des aktiven Strahlers. Ist der Strahler inaktiv, so kann keine Abhängigkeit beobachtet werden. Sämtliche weitere Qualitätsmerkmale der Ringprüfkörper zeigen ebenfalls keine Veränderung bei einer Variation der Zykluszeit. Dies gilt sowohl für Versuche, die mit aktivem als auch für welche, die mit inaktivem IR-Strahler durchgeführt wurden. Mit dem erfolgreichen Abschluss der Arbeitspakete 3, 5 und 6 könnte das Ziel 2 erreicht werden.

6.7 AP 7: Postprocessing (Voxeljet)

Maßgeblich für die Bauteileigenschaften ist neben den Einstellungen der Maschinenparameter wie Bindereintrag oder Lampensteuerung vor allem auch das Handling der Teile nach dem Druck. Die Lagerungszeit im Pulverbett und der nachgeschaltete Ofenprozess wurden als Hauptfaktoren identifiziert. Diese wirken sich massiv auf die Bauteileigenschaften wie Festigkeit, Form und Kantenschärfe aus.

6.7.1 Lagerung im Pulverbett

Um eine optimale Lagerzeit im Pulverbett zu ermitteln, wurde ein Job gebaut, der aus insgesamt sechs übereinanderliegenden Schichten aus Biegeriegeln bestand. Dabei wird die Schicht, die als erstes gebaut wurde und damit den geringsten Abstand zum Jobboxboden besitzt als erste Schicht bezeichnet. Die zuletzt gedruckte Biegeriegellage ist demnach die achte Schicht. Im Stundentakt wurden aus jeder Biegeriegelschicht Bauteile entnommen und auf Festigkeit überprüft. Außerdem wurden ebenfalls aus jeder Schicht Riegel entnommen die entweder in der Mikrowelle (4-6 min) oder im Ofen (1 h @ 200 °C)

nachbehandelt wurde. In den nachfolgenden Tabellen sind die ermittelten Festigkeitswerte der Riegel im rohen Zustand als auch nach erfolgter Wärmebehandlung in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

Tabelle 4: Festigkeitswerte im rohen Zustand als auch nach erfolgter Wärmebehandlung in Abhängigkeit von der Zeit

1. Schicht

Lagerzeit im Pulverbett [h]	1	2	3	4	5	6	7	8
Grünteilfestigkeit [N/cm ²]	120	180	180	250	220	280	260	330
Festigkeit nach Mikrowelle [N/cm ²]	510	420	450	380	500	470	370	280
Festigkeit nach Ofen [N/cm ²]	420	420	360	270	360	400	350	370

2. Schicht

Lagerzeit im Pulverbett [h]	1	2	3	4	5	6	7	8
Grünteilfestigkeit [N/cm ²]	260	310	330	330	320	490	420	400
Festigkeit nach Mikrowelle [N/cm ²]	460	410	460	320	400	450	390	300
Festigkeit nach Ofen [N/cm ²]	350	380	330	310	330	330	420	380

3. Schicht

Lagerzeit im Pulverbett [h]	1	2	3	4	5	6	7	8
Grünteilfestigkeit [N/cm ²]	270	330	350	350	350	420	380	370
Festigkeit nach Mikrowelle [N/cm ²]	400	450	500	380	460	470	500	400
Festigkeit nach Ofen [N/cm ²]	400	350	380	340	380	360	340	330

4. Schicht

Lagerzeit im Pulverbett [h]	1	2	3	4	5	6	7	8
Grünteilfestigkeit [N/cm ²]	480	360	450	330	420	390	390	380
Festigkeit nach Mikrowelle [N/cm ²]	510	400	520	330	490	460	400	250
Festigkeit nach Ofen [N/cm ²]	420	430	420	410	400	380	440	400

5. Schicht

Lagerzeit im Pulverbett [h]	1	2	3	4	5	6	7	8
Grünteilfestigkeit [N/cm ²]	400	450	450	420	430	400	270	360
Festigkeit nach Mikrowelle [N/cm ²]	500	410	490	350	590	500	380	400
Festigkeit nach Ofen [N/cm ²]	400	390	400	340	370	380	400	355

6. Schicht

Lagerzeit im Pulverbett [h]	1	2	3	4	5	6	7	8
Grünteilfestigkeit [N/cm ²]	430	460	400	390	360	420	390	400
Festigkeit nach Mikrowelle [N/cm ²]	550	460	520	360	550	480	430	310
Festigkeit nach Ofen [N/cm ²]	410	380	410	330	340	380	330	330

Die Festigkeitswerte der Riegel in der ersten Lage im rohen Zustand sind im Gegensatz zu den Riegeln aus den anderen Schichten immer geringer. Im Laufe der Zeit wird der Unterschied zwar kleiner aber die Werte bleiben immer gegenüber den Festigkeiten in den anderen Schichten zurück. Die Behandlung in der Mikrowelle bringt bei Riegeln in allen Schichten einen deutlichen Festigkeitszuwachs. Auffallend ist, dass sowohl die mikrowellenbehandelten Riegel, die nach 4 als auch nach 8 h Lagerzeit aus dem Pulverbett geborgen wurden, in ihren Festigkeiten merklich schlechter sind. Dieses Phänomen zeigen auch die Riegel, die im Ofen nachbehandelt wurden. Das könnte daran liegen, dass all diese Riegel, die für die Messung nach 4 und 8 h verwendet wurden, in einem Bereich gebaut wurden, in dem die Recoaterklinge das Pulverbett weniger gut verdichtet. Hierzu ist es notwendig in einem weiteren Druckversuch diese Ergebnisse zu reproduzieren, um den genannten Effekt auszuschließen. Im Vergleich der Mikrowellenhärtung und der Nachbehandlung im Ofen zeigt sich, dass die Mikrowellenbehandlung dem Ofen bzgl. der Festigkeitsentwicklung leicht überlegen ist. Nachdem Wärmeöfen auch mit größerem Volumen mit vergleichbaren Mikrowellen deutlich preisgünstiger sind und die Auswirkung der Mikrowellenhärtung relativ gering ausfallen, wird die Nachbehandlung des Weiteren im Ofen durchgeführt. Ab der zweiten Lage von Biegeriegeln reicht bereits eine Lagerung von 1 h im Pulverbett, wobei die Festigkeiten zur vierten Schicht bei einer Stunde Lagerung zunehmen und erst in den weiteren Lagen wieder leicht abfallen. Erklärt werden kann dies dadurch, dass die mittleren Schichten sowohl zum Jobboxboden als auch zur Phasengrenze Sandbett – Atmosphäre den größten Abstand haben und somit auch über einen längeren Zeit erhöhter Temperatur ausgesetzt sind, da der Sand ein relativ schlechter Wärmeüberträger ist und die Temperatur nur langsam abnimmt. Innerhalb der ersten Schicht an Riegeln nimmt die Temperatur schneller ab, da der Abstand zum Metallboden gering und dessen Wärmeleitfähigkeit sehr hoch ist. Nach etwa 4-5 h haben sich die Grünefestigkeiten der Riegel bis auf die der ersten Lage einander angenähert. Tabelle 4 zeigt, dass nach 7 h Lagerung im Pulverbett die Riegel bereits die Endfestigkeit erreicht haben und durch Ofennachbehandlung keine weitere Steigerung mehr erreicht wird. Sicher entpackbar sind alle Teile nach 4 h ($\sigma > 240 \text{ N/cm}^2$).

6.7.2 Restfeuchtegehalt

In vorausgehenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass ein Restfeuchteanteil in den Bauteilen von großer Bedeutung ist. Einerseits soll der Gehalt hinsichtlich des Abgusses möglichst gering sein, um den Gasstoß beim Abguss möglichst klein zu halten. Ist die Feuchtigkeit zu hoch verdampft beim Eingießen des Metalls das Wasser und bahnt sich seinen Weg durch die Schmelze, wodurch Gussfehler entstehen. Auf der anderen Seite hängt die Festigkeit der Bauteile von der Feuchtigkeit ab. Werden Anorganikbauteile zu stark ($< 0.2\%$ Restfeuchte) getrocknet sinkt die Festigkeit deutlich ab, dass die Teile nicht mehr zerstörungsfrei gehandhabt werden können. Als idealer Kompromiss zwischen Festigkeit und Abgussverhalten hat sich ein Restfeuchtegehalt von ca. 0.3% erwiesen. Die Feuchtigkeit kann durch den Ofenprozess eingestellt werden. Die Restfeuchte hängt einerseits von der verwendeten Temperatur und Zeit aber auch von den Wandstärken der Bauteile ab (Tabelle 5).

Tabelle 5: Restfeuchtegehalt in Abhängigkeit der Wandstärke und der Trocknungszeit

t [min]	Restfeuchte [%]			
	3 mm	20 mm	60 mm	100 mm
0	1,94	1,78	2,31	2,4
30	0,22	0,28	0,71	1,9
60	0,22	0,19	0,39	0,77
90	0,07	0	0,35	0,31
120	0	0	0,18	0,17

Als Ofentemperatur wurde 200 °C gewählt, da sich diese in vorangegangenen Versuchen als geeignet erwiesen hat. Wie erwartet fällt die Restfeuchte bei dünneren Wandstrukturen schneller ab als bei solchen mit dickeren Wandstärken. Ziel war es einen Parametersatz zu finden der möglichst universell einsetzbar ist. Es hat sich gezeigt, dass das bei einer Trocknungszeit von 1 h bei 200 °C gegeben ist. Ab etwa 100 mm Wandstärke muss der Trocknungsprozess um etwa 30 Minuten erweitert werden, dann können Restfeuchtwerte von ca. 0.3% erreicht werden. Für noch dickere Wandstärken muss der Vorgang entsprechend angepasst werden. Nach dem Abkühlen der Bauteile, müssen diese schnellstmöglich in luftdichte Kunststoffbeute verpackt werden, um den eingestellten Feuchtegehalt beizubehalten.

Durch den erfolgreichen Abschluss von AP 7 konnte das Ziel 4 erreicht werden.

6.8 AP 8: Recycling (Voxeljet)

Wie zuvor bereits beschrieben, waren die Anstrengungen den preisintensiven HSQ Sand durch einen Standardgießerei Quarzsand zu ersetzen wenig erfolgreich. Die gewünschten physikalischen Eigenschaften konnten nicht erreicht werden. Daher ist es wirtschaftlich besonders wichtig den ungebundenen Sand wiederzuverwenden. Mehrere Versuche wurden hierzu durchgeführt. Dabei wurden auch unterschiedliche Verhältnisse von frischem und bereits gebrauchtem Sand dem Druckprozess zugeführt. Bei allen Mischungen zeigte sich, dass sowohl die Festigkeit als auch die Kantenschärfe und Detailtreue deutlich absinken und nicht mehr die Minimalanforderungen an das System erreicht werden konnte. Grund hierfür ist besonders in der thermischen Schädigung des bereits prozessierten Sandes, im Speziellen des Wasserglases zu sehen.

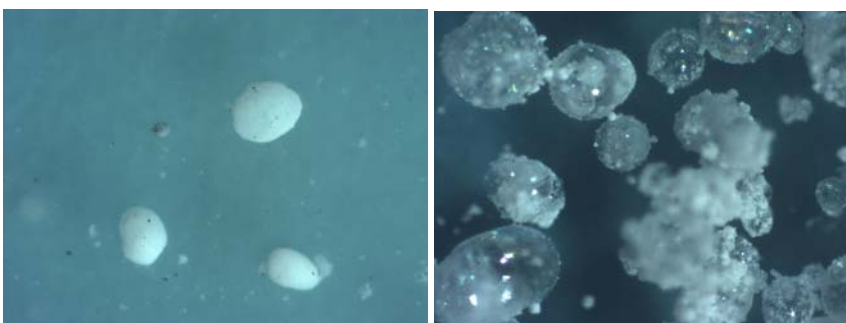


Abbildung 21: Wasserglas vor (links) und nach thermischer Schädigung (rechts)

Abbildung 22 zeigt das sprühgetrocknete Wasserglas vor als auch nach dem Druckprozess. Das bereits thermisch veränderte Wasserglas reagiert nicht mehr auf die gleiche Weise mit der Druckflüssigkeit, vielmehr lässt es sich praktisch nicht mehr an- geschweige denn auflösen. Zwangsläufig führt daher eine Zumischung von bereits gebrauchtem Pulver sofort zu Festigkeitsverlust. Recycling des bereits benutzten Pulvers führt zu Prozessinstabilität und zu einem deutlichen absinken der Qualität.

Aufgrund der in AP 8 beschriebenen Problematik konnte das Ziel 5 nicht erreicht werden. Um dieses Ziel zu erreichen ist ggf. der Wechsel auf ein anderes anorganisches Bindersystem notwendig.

6.9 AP 9: Entwicklung Testgeometrie Gussteil (utg)

Gemeinsam mit den unterstützenden Gießereien der Firmen ACO und BMW geeignete Versuchsteile zur Durchführung der Gießversuche definiert. Mit der Firma ACO wurde ein Pumpengehäuse aus Gusseisen ausgewählt. Hierbei werden die Kerne im Serienverfahren durch Kernschießen mit einem organischen PUR-Cold-Box-Binder hergestellt. Die Außenform wird durch einen bentonitgebundenen Sand in einem Formkasten dargestellt. Für die Gießversuche wurden die Cold-Box Kerne durch gedruckte, anorganisch gebundenen Kerne ersetzt.

Gemeinsam mit der Leichtmetallgießerei der BMW Group in Landshut wurde ein Aluminium-Zylinderkopf als Versuchsteil ausgewählt. In dem Gießprozess für dieses Teil werden bereits standardmäßig anorganische Binder eingesetzt. Die Kerne werden mit dem Kernschießverfahren hergestellt. Die Außenform wird durch eine Dauerform (Stahlkokille) dargestellt. Für die Gießversuche wurde der komplexe Wassermantelkern des Zylinderkopfs durch einen gedruckten Kern ersetzt und im Seriengießprozess vergossen.

Im Rahmen der Untersuchung der Heißverbiegung von dünneren Strukturen wurde bei voxeljet eine Gussform konstruiert, die schnell Rückschlüsse auf die Verbiegung der Bauteile beim Abguss zulassen. In eine Form werden Rohre unterschiedlicher Durchmesser in diese Form eingelegt. Sowohl die Außenform als auch die Kerne wurden aus den gedruckten Kernen hergestellt.

6.10 AP 10: Definition Prüfmethodik Gussteile (utg)

Bei der Herstellung der Gusseisen Pumpengehäuse wurde der Gießprozess optisch überwacht. Nach dem Gießen erfolgte das standardmäßige Entkernen und Putzen der Versuchsteile. Abschließend wurden sie einer optischen Befundung unterzogen.

Der Gießprozess der Aluminium-Zylinderköpfe wurde ebenfalls begleitet und optisch dokumentiert. Versuchsteile wurden der serienmäßigen Gussteilnachbehandlung (Entkernen und Putzen) zugeführt. Die Versuchsteile wurden einer CT-Analyse unterzogen.

6.11 AP 11: Abgüsse Testgeometrie und Serienteile in Aluminium und Gusseisen (utg)

Sowohl mit ACO als auch mit BMW wurden die in AP 9 vereinbarten Versuchsgussteile innerhalb der Projektlaufzeit abgegossen.

6.11.1 Gießversuche ACO

Bei der Firma ACO erfolgten die Gießversuche in Gusseisen. Abbildung 22 zeigt einen anorganisch gedruckten Kern, der in den Formkasten eingelegt wurde und ein hergestelltes Versuchsteil.

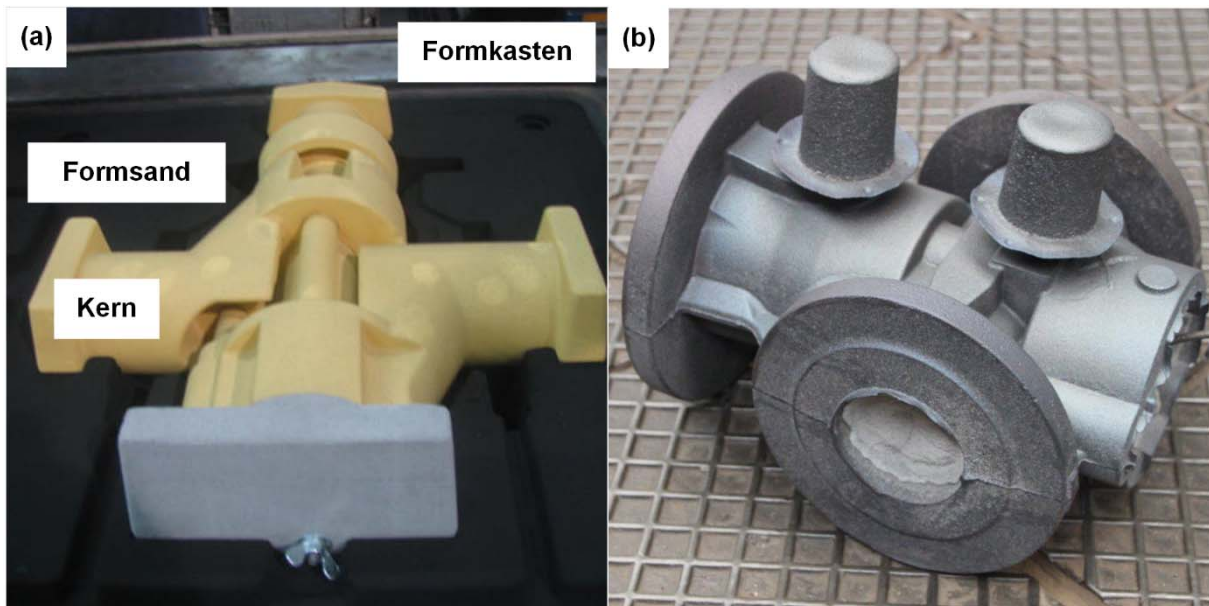


Abbildung 22: Gedruckter, anorganisch gebundener Kern in der Gussform vor dem Zulegen der Form (a). Durch die Schlichte nimmt der Kern eine gelbliche Farbe an. Gussteil vor dem Putzen und Entkernen (b).

Vor dem Einlegen in den Formkasten wird der Kern mit einer Schlichte überzogen, wodurch die gelbliche Färbung zustande kommt. Nach dem Einlegen des Kerns wird die obere Formhälfte zugelegt und es kann der Abguss der Form erfolgen. Beim Abguss mussten die gedruckten Kerne mit größerer Sorgfalt als die serienmäßig verwendeten Cold-Box-Kerne eingelegt werden. Durch die Sprödigkeit der Kerne kam es vereinzelt zu Beschädigungen an den Kernen. Dennoch konnte in einem Formkasten ein direkter Vergleich eines organischen Cold-Box-Kerns mit einem gedruckten, anorganisch gebundenen Kern durchgeführt werden.

6.11.2 Gießversuche BMW

Bei der Leichtmetallgießerei der BMW Group in Landshut konnten die geplanten Gießversuche ebenfalls erfolgreich durchgeführt werden. Die Kerne wurden der Serienfertigung übergeben und während dem Laufenden Gießbetrieb vergossen. Abbildung 23 zeigt einen gedruckten, anorganisch gebundenen Kern der Seriengeometrie sowie das Einfüllen der Aluminiumschmelze im Seriengießprozess bei der BMW Group in Landshut.

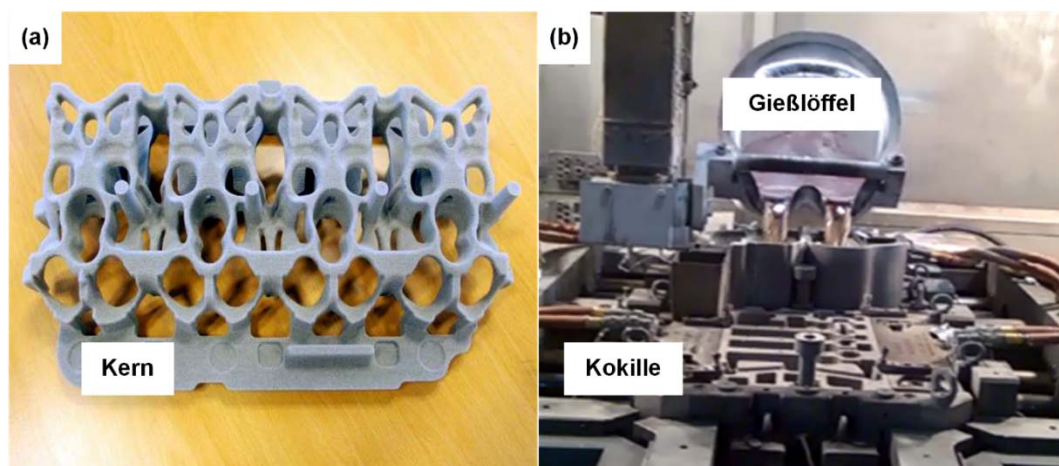


Abbildung 23: Gedruckter, anorganisch gebundener Versuchskern (a) und Einfüllen der Aluminiumschmelze in die Kokille während des Gießversuchs (b).

Die teils manuelle, teils maschinelle Handhabung der Kerne verursachte keine Schäden an dem filigranen Wassermantelkern. Beim Einfüllen der Aluminiumschmelze in die Kokille konnte teilweise Blasenbildung durch austretendes Kerngas beobachtet werden.

6.12 AP 12: Charakterisierung Gussteile (utg)

6.12.1 Gießversuche ACO

Abbildung 24 zeigt zwei Übersichtsaufnahmen von Versuchsteilen, die mit einem anorganisch gedruckten Kern (a) und einem organischen geschossenem Kern (b) hergestellt wurden.

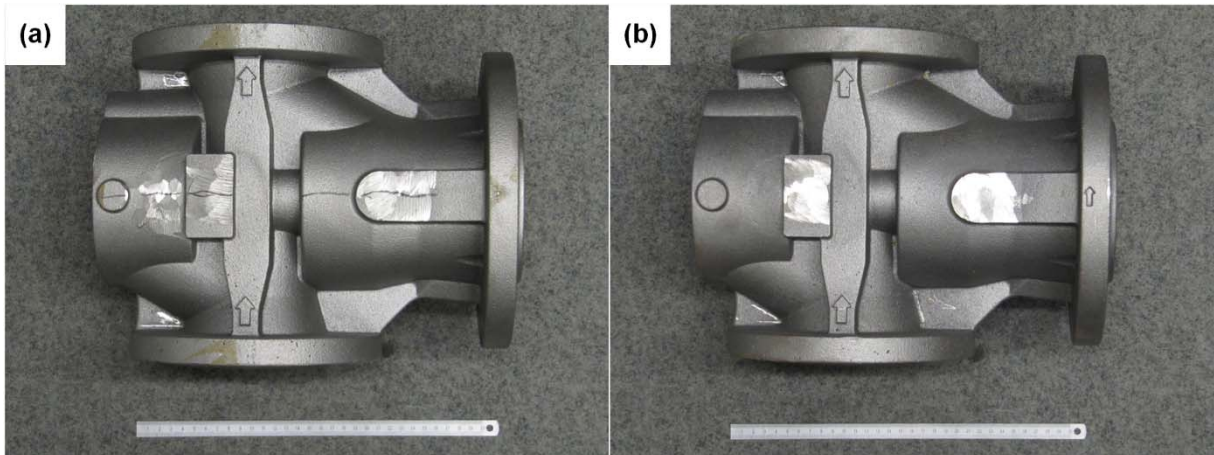


Abbildung 24: Übersicht des Gusseisenversuchsteils mit gedrucktem Anorganikkern (a) und geschossenem Cold-Box-Kern (b)

Äußerlich kann kein Unterschied an den Gussteilen festgestellt werden. Abbildung 25 zeigt eine Detailaufnahme des Gussteilinneren der identischen Teile.

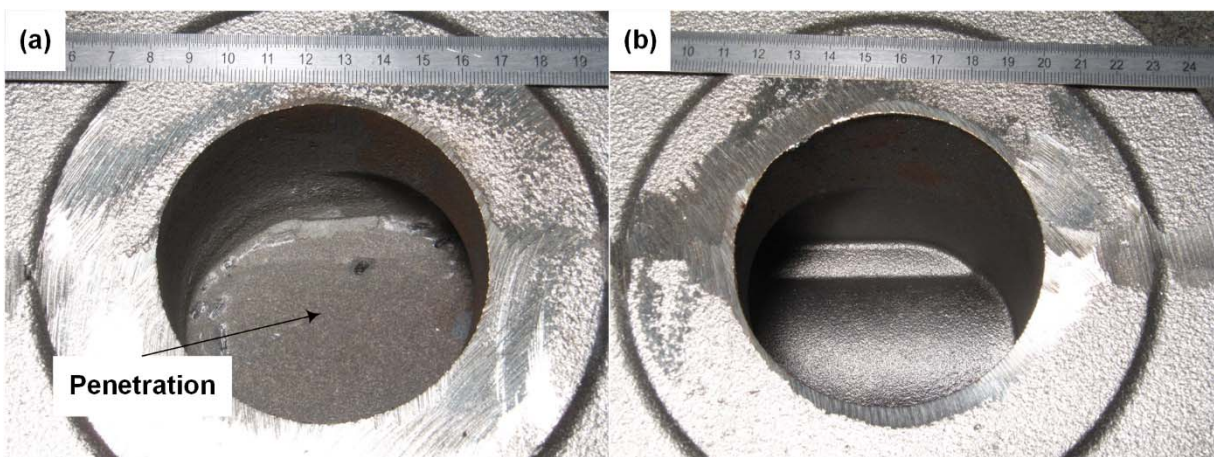


Abbildung 25: Detailaufnahme 1 des Gussteilinneren. Bei der Verwendung des gedruckten Anorganikkerns (a) kam es zu Penetration an der Gussteiloberfläche. Bei Verwendung des Cold-Box-Kerns ist die Gussteiloberfläche i.O.

Die Verwendung des anorganisch gedruckten Kerns verursacht in diesem Falle Penetration an der inneren Gussteiloberfläche. Diese äußert sich durch fest anhaftende Sandpartikel an der Oberfläche. Das Serienteil, bei dem ein organisch gebundener Kern verwendet wurde, zeigt diesen Gussfehler nicht. Abbildung 26 zeigt eine weitere Detailaufnahme des Gussteilinneren.

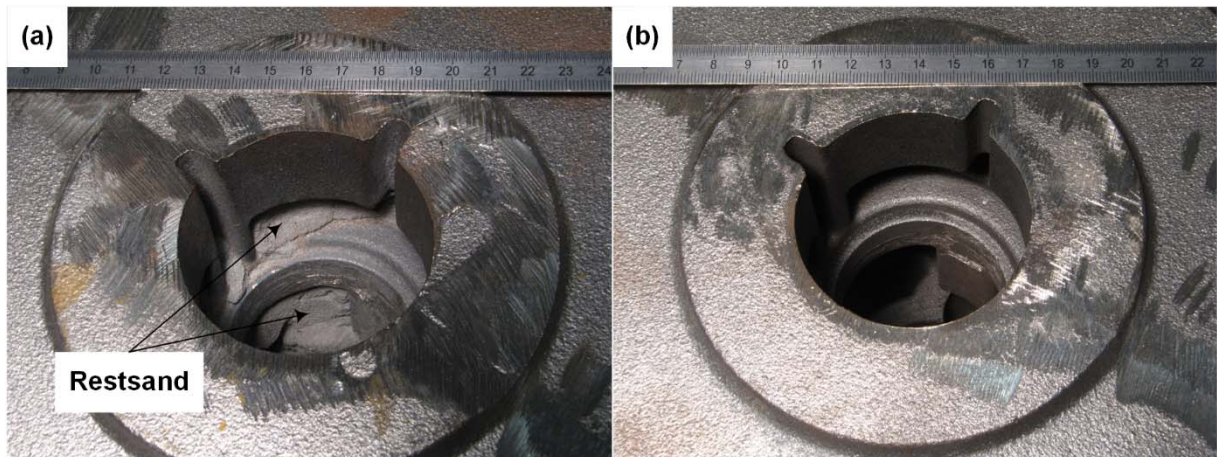


Abbildung 26: Detailaufnahme 2 des Gussteilinneren. Bei der Verwendung des gedruckten Anorganikkerns (a) verbleibt Restsand nach dem Entkernen im Gussteil. Bei Verwendung des Cold-Box-Kerns kann das Gussteil vollständig entkernt werden.

In dieser Aufnahme sind im Falle des anorganisch gebundenen Kerns Sandreste zu erkennen, die bei der Entkernung nicht aus dem Gussteilinneren entfernt werden konnten. Der organisch gebundene Kern kann vollständig entkernt werden.

6.12.2 Gießversuche BMW

Eines der bei der BMW Group hergestellten Versuchsteile wurde einer CT-Analyse unterzogen. Abbildung 27 zeigt einen charakteristischen Bildausschnitt einer der CT-Analysen.

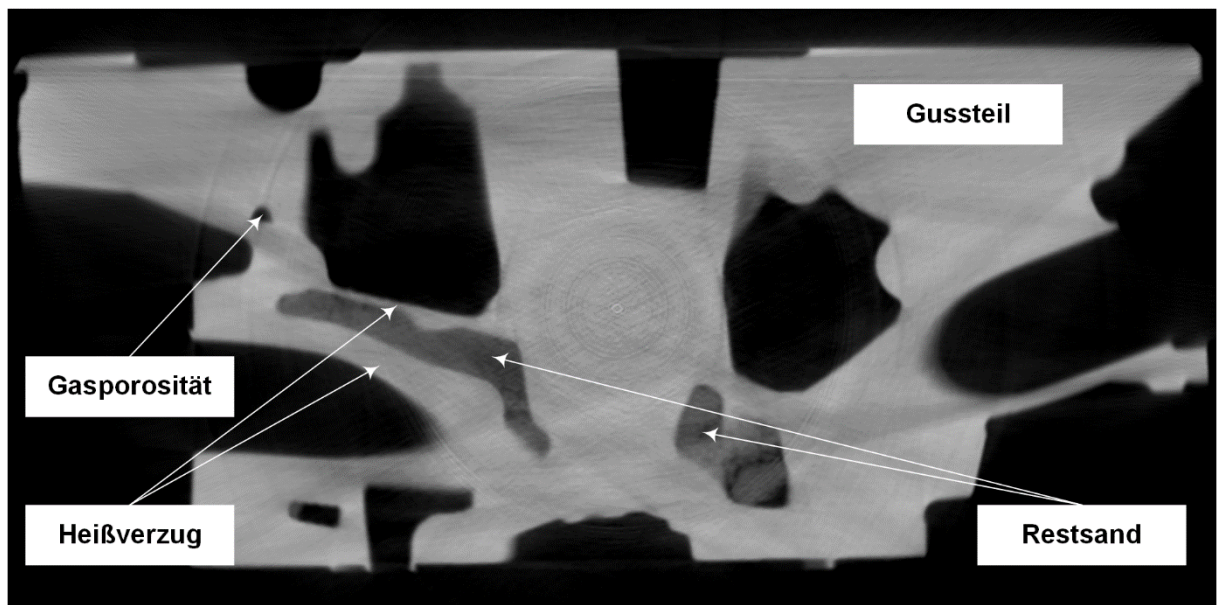


Abbildung 27: Ausschnitt einer CT-Analyse eines Versuchsteils, welches mit einem anorganisch gedruckten Kern hergestellt wurde. Das Versuchsteil zeigt die Gussfehler Gasporosität, Heißverzug und Restsand.

Die bereits in AP 11 beschriebene Blasenbildung während des Abgusses verursacht Gasporosität im Gussteil. Diese äußert sich durch rundliche Ungängen in den oberen Bereichen des Versuchsteils. Während der Kern von der flüssigen Schmelze umgeben ist, kommt es zu einem thermischen Verzug des Kerns. Die mit „Heißverzug“ gekennzeichneten Bereiche des Gussteils sollten ähnliche Wandstärken aufweisen. Der thermische Verzug des Kerns führt zu einer Aufwölbung des Kerns, die

wiederum diese geometrische Abweichung verursacht. Nach dem Entkernen des Gussteils konnte in den CT-Analysen Restsand im Gussteil festgestellt werden. Zum Vergleich der der Versuchsteile wurden Serienteile, die mit anorganisch gebundenen, geschossenen Kernen hergestellt werden, herangezogen. Diese zeigen keine der hier beschriebenen Gussfehler.

Mit dem Abschluss der Arbeitspakete 9, 10, 11 und 12 konnte das Ziel 6 erreicht werden.

6.13 AP 13: Dokumentation (utg / Voxeljet)

Die Dokumentation während des Projekts erfolge gemäß der DBU Richtlinien und wird mit dem vorliegenden Abschlussbericht abgeschlossen. Im Laufe des Projekts und nach Projektabschluss wurden die Erkenntnisse durch die folgenden Maßnahmen aktiv verbreitet und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt:

6.13.1 Veröffentlichungen in Fachzeitschriften

- Ramakrishnan, R.; Griebel, B.; Volk, W.; Günther, D.; Günther, J.: *Prozessentwicklung für das 3-D-Drucken mit anorganischen Formstoffsystemen*. GIESSEREI 101 (2014), 46 - 55.
- Ramakrishnan, R.; Griebel, B.; Volk, W.; Günther, D.; Günther, J.: *Prozessentwicklung für das 3-D-Drucken mit anorganischen Formstoffsystemen*. GIESSEREI RUNDSCHAU 61 (2014), 152 - 161. (Nachdruck).
- Ramakrishnan, R.; Griebel, B.; Volk, W.; Günther, D.; Günther, J.: *3D Printing of Inorganic Sand Moulds for Casting Applications*. Advanced Materials Research 1018 (2014), 441 - 449.

6.13.2 Vorträge

- Ramakrishnan, R.; Volk, W.: *Prozessentwicklung für das 3D-Drucken mit anorganischen Formstoff-systemen*. Barbaratagung, Friedberg (Hessen), 22.11.2013.
- Ramakrishnan, R.; Volk, W.: *Prozessentwicklung für das 3D-Drucken mit anorganischen Formstoff-systemen*. Barbaratagung, Garching bei München, 28.11.2013.
- Volk, W; Ramakrishnan, R.; Griebel, B.: *3D-Drucken und Kernschießen mit anorganischen Formstoffsystemen*. Österreichische Gießereitagung, Bad Ischl, 25.04.2014
- Volk, W; Ramakrishnan, R.; Griebel, B.: *3D-Drucken und Kernschießen mit anorganischen Formstoffsystemen: Aktuelle Forschungsergebnisse und zukünftige Forschungsvorhaben am utg*. Deutscher Gießereitag, Hamburg, 16.05.2014.
- Ramakrishnan, R.; Griebel, B.; Volk, W.; Günther, D.; Günther, J.: *3D Printing of Inorganic Sand Moulds for Casting Applications*. WGP Kongress, Erlangen, 10.09.2014.
- Griebel, B.; Ramakrishnan, R.; Volk, W.: *Festigkeitsprüfung von generativ hergestellten Formstoffen für die Gießereiindustrie*. testXpo, Ulm, 16.10.2014
- Ramakrishnan, R.; Volk, W.: *3D Printing of Sand Molds and Cores with Eco-Friendly Binders for Casting Applications*. RAPID, Long Beach, California, USA, 19.05.2015.

6.13.3 Sonstige

- Ramakrishnan, R.: *3-D-Drucken mit einem anorganischen Formstoffsystem*. Dissertation, Technische Universität München, Veröffentlichung vsl. 2016.

7 Fazit

Additive Fertigungsverfahren haben nach ihrer rasanten Entwicklung der letzten 30 Jahre nunmehr einen festen Platz in der Produktionstechnik eingenommen. Eine Branche, in der sich die generative Fertigung bereits früh etablieren konnte, ist die Gießereiindustrie. Durch die Kombination von additiven Fertigungsverfahren mit konventionellen Verfahrensschritten aus der Gießereitechnik lassen sich die Vorteile beider Technologien in der sogenannten indirekten additiven Fertigung vereinen. So können beispielsweise konventionell nicht darstellbare Geometrien realisiert und die Entwicklungszeiten drastisch verkürzt werden. Gleichzeitig bleibt die Qualität des Gussteils weitestgehend unangetastet, da der additive Fertigungsprozess lediglich das Modell oder die Form generiert. Neben der Verbreitung generativer Fertigungsverfahren im Bereich der Gießereitechnik kann auch ein Umdenken zu umwelt- und mitarbeiterfreundlicheren Fertigungsprozessen in der Branche festgestellt werden. Dies ist nicht zuletzt auf politische Rahmenbedingungen zurückzuführen, nach denen sich Gießereien in hochtechnologisierten Ländern richten müssen. Eine zentrale Maßnahme hierbei ist die Reduktion toxischer Emissionen, die größtenteils aus organischen Bindemitteln stammen. Diese werden zunehmend von anorganischen Bindersystemen verdrängt, die neben positiven ökologischen Aspekten auch technologische und wirtschaftliche Vorteile bringen.

Das von der DBU geförderte Forschungsvorhaben lässt sich an der Schnittstelle der beiden genannten technologischen Entwicklungen einordnen und leistet einen Beitrag zum Verständnis des additiven Herstellens von anorganisch gebundenen Gussformen und Kernen. Im Rahmen des Projekts wurde ein industrielles 3-D-Drucksystem auf die Verarbeitung eines anorganischen Natriumsilikatbinders umgerüstet. Dabei wurden umfangreiche Möglichkeiten der Prozesssteuerung und -überwachung geschaffen. Ebenfalls erfolgte die Anpassung und Weiterentwicklung von Formstoffprüfverfahren um hergestellte Prüfkörper charakterisieren zu können. Im Rahmen von unabhängigen Versuchsreihen wurden ausgewählte Faktoren der einzelnen Prozessschritte variiert und die Veränderungen von relevanten Ausgangsgrößen gemessen und interpretiert. Hierbei stand sowohl die Homogenität der Teileeigenschaften innerhalb eines Bauprozesses als auch die Prozessreproduzierbarkeit stets im Fokus. Abschließend wurden gedruckte, anorganische Kerne in Gusseisen- und Aluminiumteilen eingegossen und die Versuchsgussteile unter verschiedenen Aspekten bewertet. Zusammenfassend lassen sich folgende zentrale Erkenntnisse festhalten:

- Eine umfangreiche Prozessüberwachung sowie eine größtmögliche Standardisierung von Prozess- und Prüfabläufen sind unabdingbar für die Reproduzierbarkeit der Teileeigenschaften. Dennoch lassen sich prozess- und prüfbedingte Unsicherheiten nicht vollständig vermeiden.
- Die Prozesstemperatur, die während der Herstellung von Formen und Kernen im 3-D-Drucker herrscht, wird maßgeblich durch den Energieeintrag und die Zykluszeit bestimmt.
- Die Binderkonzentration und der Fluideintrag bestimmen vornehmlich die Dichte der gedruckten Teile. Der Energieeintrag und die Zykluszeit haben einen signifikanten, jedoch untergeordneten Einfluss.
- Die Bestimmung der Permeabilität ist mit verhältnismäßig großer Unsicherheit behaftet, deren Ursache hauptsächlich in dem verwendeten Prüfverfahren zu suchen ist. Dennoch zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Permeabilität von den Faktoren Binderkonzentration und Fluideintrag.
- Auf die Festigkeit nehmen die meisten der untersuchten Faktoren Einfluss. Der Fluideintrag ist hier der dominierende Faktor, da er für die Aktivierung des Sand-Binder-Systems verantwortlich ist. Ebenfalls müssen die Binderkonzentration und der Energieeintrag berücksichtigt werden.

- Bei der Erhöhung des Energieeintrags muss mit dem Auftreten von Curl gerechnet werden. Sämtliche andere Faktoren zeigen auf die Ausprägung von Curl keinen Einfluss.
- Die Fluidmigration wird signifikant von der Binderkonzentration, dem Fluideintrag und dem Energieeintrag beeinflusst.
- Der Abrieb zeigt lediglich von dem Fluideintrag eine signifikante Abhängigkeit. Hier ist unterhalb eines kritischen Fluideintrags eine exponentielle Zunahme des Abriebs zu beobachten.
- Es war nicht möglich den HSQ Sand, als großer Kostenfaktor des Sandsystems, zu ersetzen, ohne an Qualität und Festigkeit der Bauteile zu verlieren. Auch eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit erbrachte keine weiteren Verbesserungen. Es zeigte sich, dass durch das standardmäßige Entgasen des Binders die Prozessstabilität als auch die Lebensdauer der Druckmodule verbessert werden konnte.
- In Lagerversuchen im Pulverbett über die Zeit konnte eine optimale Entpackzeit von 4-5 h nach dem Drucken ermittelt werden. Nach dieser Zeit sind die Festigkeiten der Bauteile unabhängig von der Bauteillage ausreichend. Durch einen nachgeschalteten Temperierungsschritt kann die Festigkeit noch weiter erhöht und die Feuchtigkeit auf einen Wert von 0,2% - 0,3% eingestellt werden. Bauteile mit niedrigerer Restfeuchte weisen nur noch eine geringe bis gar keine Festigkeit mehr auf, bei höheren Werten treten vermehrt Probleme beim Guss auf.
- Auch wenn vor allem aufgrund des hohen Preises des Materialsystems ein Recycling des nicht gebundenen Sandes von großem Interesse ist, musste festgestellt werden, dass das ungebundene Material, im Speziellen das sprühgetrockneten Wasserglases, während dem Prozess thermisch geschädigt wird. Die Festigkeitsentwicklung der Bauteile, die auch nur aus einem Bruchteil wiederverwendeten Sandes bestehen, bleibt deutlich hinter den Anforderungen zurück. Außerdem sind die Teile qualitativ merklich schlechter und nicht für den Guss geeignet.
- Gießversuche mit Gusseisen zeigen eine grundsätzliche Einsatzfähigkeit der anorganisch gedruckten Kerne. Bei der Handhabung ist im Vergleich mit organisch gebundenen Kerne größere Sorgfalt anzuwenden. Die Versuchsteile zeigten Gussfehler in Form von Penetration und Restsand.
- Gießversuche mit Aluminium zeigten ebenfalls eine grundsätzliche Einsatzfähigkeit der anorganisch gedruckten Kerne. Sie konnten die manuelle und maschinelle Handhabung unbeschadet überstehen. Austretendes Kerngas verursachte Gasporosität in den Versuchsteilen. Ebenfalls kam es zu den Gussfehlern Heißverzug und Restsand.

Sowohl die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens aufgebaute Prozess- und Prüfmethodik als auch die aus der Faktorenvaryation und den Gießversuchen gewonnenen Erkenntnisse bilden eine breite Ausgangsbasis für weiterführende Untersuchungen. Diese sollten sich im Schwerpunkt den folgenden Themengebieten widmen:

- Reproduzierbarkeit: Durch eine verbesserte Steuerung der Eingangsgrößen ist mit einer deutlichen Steigerung der Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften zu rechnen. Hierbei sollte der Fokus auf einer gleichbleibenden Qualität des Sand-Binder-Systems sowie auf der Klimatisierung des Druckprozesses und der Lagerung liegen.
- Prüfverfahren: Die Bestimmung der Qualitätsmerkmale basiert größtenteils auf Weiterentwicklungen und Modifikationen verfügbarer Prüfverfahren. Sowohl im Bereich der Formstoffprüfung als auch bei der Bewertung von additiv hergestellten Bauteilen besteht weiterhin ein großer Bedarf an aussagekräftigen und verfahrensangepassten Prüfverfahren.
- Faktorenkombination: Je nach Anforderungen kann eine kombinierte Anpassung mehrerer Faktoren zu dem gewünschten Ergebnis führen. Demzufolge birgt eine kombinierte

Faktorenvariation großes Potential für die Einstellung designierter Eigenschaften der gedruckten Teile.

- Material: Ebenfalls ist von einem großen Potential bei der Weiterentwicklung des Sand-Binder-Systems auszugehen. Es ist anzunehmen, dass die chemischen Eigenschaften sowie die Morphologie des Binders signifikanten Einfluss auf die Qualitätsmerkmale haben. Das volle Potential des Verfahrens kann demzufolge nur durch die kombinierte Betrachtung von Material und Prozess ausgeschöpft werden.
- Gießversuche: Durch weitere Gießversuche kann herausgearbeitet werden, ob sich messbare Veränderungen am Formstoffsystem auch in den Gussteilen / Gussfehlern wiederfinden. Die Entkernbarkeit im Aluminium und im Gusseisen könnte durch zerfallsfördernde Zusätze verbessert werden. Gasporosität sollte sich durch eine Reduktion der Kernfeuchte und einer Verbesserung der Permeabilität beseitigen lassen. Durch diese Maßnahmen entsteht zum einen weniger Kerngas und zum anderen kann es besser durch den Kern zu den Entlüftungen transportiert werden. So lässt sich das Auftreten von Gasblasen beim Abguss vermeiden. Zur Minimierung des Heißverzugs bieten sie ebenfalls Formstoffzusätze (z.B. Phosphate) an. Diese erhöhen die Erweichungstemperatur des Natriumsilikats und vermindern somit den thermischen Verzug.

Durch weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den genannten Schwerpunktbereichen lassen sich noch bestehende Prozessunsicherheiten minimieren und die Qualität der hergestellten Formen, Kerne und Gussteile steigern. Diese Maßnahmen ermöglichen eine gezielte Anpassung des Eigenschaftsprofils dieser Formstoffsysteme an die Anforderungen verschiedener Gießprozesse. Somit kann die industrielle Akzeptanz dieses Verfahrens gesteigert und die Substitution organischer Binder weiter vorantreiben werden.

8 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)
- [DANZ02] Danzer, R., T. Lube et al.:
Verfahren und Einrichtung zur Bestimmung der Bruchfestigkeit von spröden Werkstoffen.
Patent AT 411 714 B.
- [DANZ09] Danzer, R., P. Supancic und W. Harrer (2009):
Der 4-Kugelversuch zur Ermittlung der biaxialen Biegefestigkeit spröder Werkstoffe.
Technische Keramische Werkstoffe. Hrsg. Von Kriegesmann. Bd. 113.
- [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)
- [HOEL13] Hölting, B. und W. G. Coldewey:
Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie.
8. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- [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)
- [RAMA14] Ramakrishnan, R.; Griebel, B.; Volk, W.; Günther, D.; Günther, J.:
3D Printing of Inorganic Sand Moulds for Casting Applications.
Advanced Materials Research 1018 (2014), 441 - 449.

- [ROSE10] B. Rose:
Leichtmetallguss mit anorganisch gebundenen Kernsandten. 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)
- [VDG96] VDG Merkblatt P41 - *Prüfung von tongebundenen Formstoffen - Bestimmung der Gasdurchlässigkeit.* Düsseldorf (1996)
- [VDG97] VDG Merkblatt P38 - *Prüfung von tongebundenen Formstoffen - Bestimmung der Festigkeit.* Düsseldorf (1997)
- [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)

9 Anhang

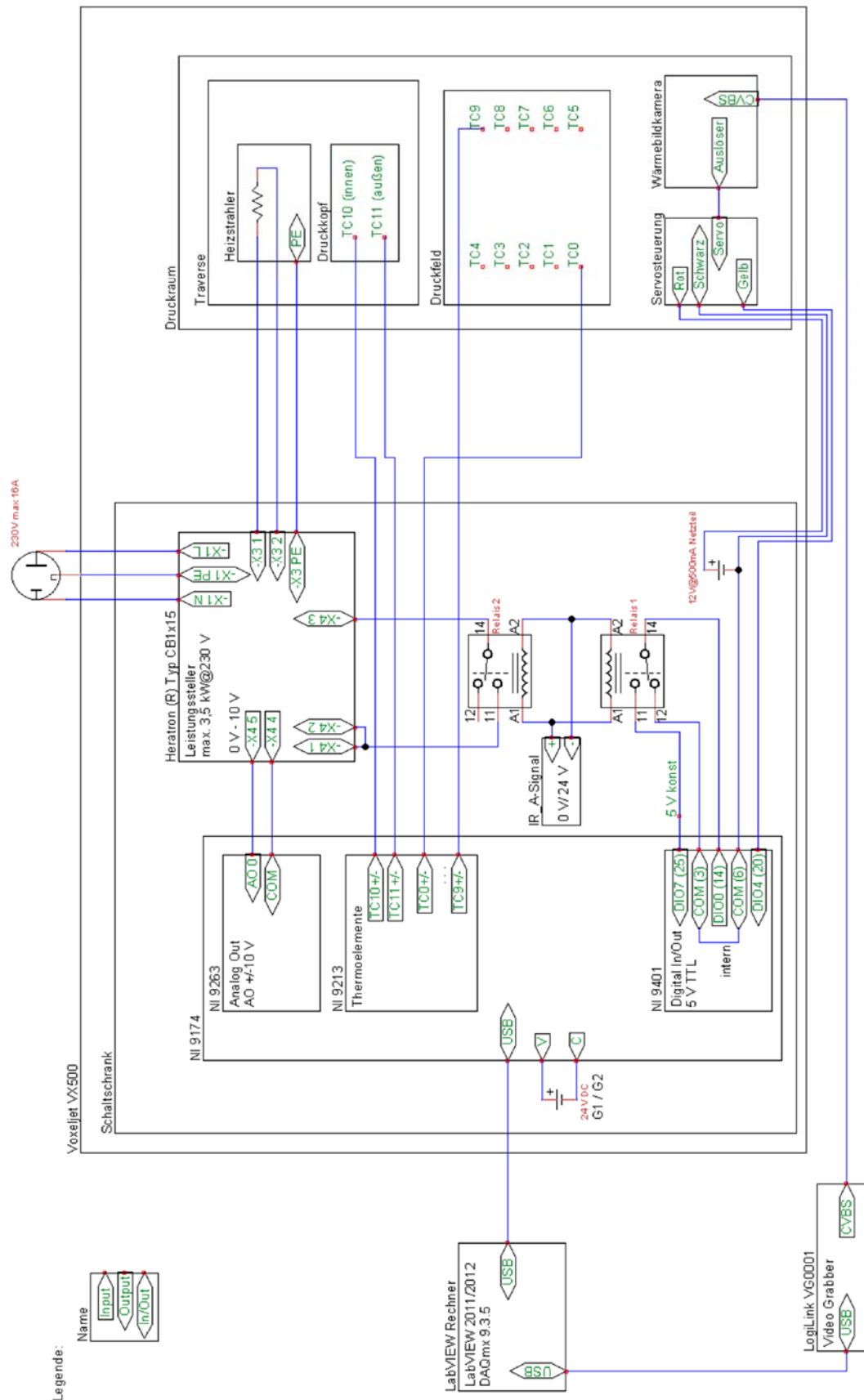


Abbildung 28: Schaltplan der thermischen Prozesssteuerung- und Überwachung

TABELA PORÓWNAWCZA ZALEŻNOŚCI PRZEPUSZCZALNOŚCI OD CIŚNIENIA W UKŁADZIE MIESZANYM I SI									strona
Ciśnienie p_1 w cm słupa wody	Przepuszczalność				Ciśnienie p_1 w cm słupa wody	Przepuszczalność			
	dysza ϕ 0.5 mm		dysza ϕ 1.5 mm			dysza ϕ 0.5 mm		dysza ϕ 1.5 mm	
	Układ mieszany $\text{cm}^4/\text{G}\cdot\text{min}$	Układ SI $10^8\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$	Układ mieszany $\text{cm}^4/\text{G}\cdot\text{min}$	Układ SI $10^8\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$		Układ mieszany $\text{cm}^4/\text{G}\cdot\text{min}$	Układ SI $10^8\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$	Układ mieszany $\text{cm}^4/\text{G}\cdot\text{min}$	Układ SI $10^8\text{m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$
0.1					5.1	14.3	24.3	134	228
0.2					5.2	13.8	23.4	128	217
0.3					5.3	13.4	22.8	126	214
0.4			2450	4164	5.4	13.0	22.1	122	207
0.5			2000	3400	5.5	12.6	21.4	119	202
0.6			1620	2753	5.6	12.2	20.7	115	195
0.7			1350	2294	5.7	11.8	20.0	112	190
0.8			1200	2039	5.8	11.4	19.4	108	183
0.9			1060	1801	5.9	11.0	18.7	105	178
1.0			950	1614	6.0	10.7	18.2	102	173
1.1			850	1 444	6.1	10.3	17.5	99	168
1.2			780	1326	6.2	10.0	17.0	96	163
1.3			710	1207	6.3	9.7	16.5	93	158
1.4			650	1105	6.4	9.4	16.0	90	153
1.5			610	1037	6.5	9.0	15.3	88	149
1.6			550	935	6.6	8.8	15.0	85	144
1.7			525	892	6.7	8.5	14.4	82	139
1.8			492	836	6.8	8.2	14.0	80	136
1.9			467	794	6.9	7.9	13.4	77	131
2.0	49.0	83.8	440	748	7.0	7.7	13.1	75	127
2.1	47.0	79.9	417	709	7.1	7.5	12.7	73	124
2.2	44.0	74.8	398	676	7.2	7.2	12.2	70	119
2.3	42.0	71.4	376	639	7.3	7.0	11.9	67	114
2.4	40.0	68.0	358	608	7.4	6.7	11.4	65	110
2.5	38.0	64.6	341	579	7.5	6.5	11.0	63	107
2.6	36.0	61.2	326	554	7.6	6.3	10.7	61	104
2.7	34.0	57.8	313	532	7.7	6.0	10.2	58	98.6
2.8	33.0	56.1	300	510	7.8	5.8	9.8	56	95.2
2.9	31.0	52.7	287	488	7.9	5.6	9.5	54	91.8
3.0	30.0	51.0	275	467	8.0	5.3	9.0	52	88.4
3.1	29.0	49.3	264	449	8.1	5.1	8.7	50	85.0
3.2	28.0	47.6	253	430	8.2	4.9	8.3	48	81.6
3.3	27.0	45.9	242	413	8.3	4.7	8.0	46	78.2
3.4	25.8	43.9	235	399	8.4	4.4	7.5	44	74.8
3.5	24.2	41.1	226	384	8.5	4.2	7.1	42	71.4
3.6	23.4	39.8	219	372	8.6	4.0	6.8	40	68.0
3.7	22.7	38.8	212	360	8.7	3.7	6.3	38	64.5
3.8	21.8	37.0	205	348	8.8	3.5	6.0	36	61.2
3.9	21.0	35.7	198	336	8.9	3.3	5.6		
4.0	20.0	34.0	193	328	9.0	3.1	5.3		
4.1	19.5	33.1	185	314	9.1	2.9	4.9		
4.2	19.0	32.3	178	302	9.2	2.6	4.4		
4.3	18.4	31.3	173	294	9.3	2.4	4.1		
4.4	17.8	30.2	167	284	9.4	2.2	3.7		
4.5	17.3	29.4	163	277	9.5	1.9	3.2		
4.6	16.7	28.4	156	265	9.6	1.7	2.9		
4.7	16.2	27.5	151	257	9.7	1.4	2.4		
4.8	15.7	26.7	146	248	9.8	1.1	1.9		
4.9	15.2	25.8	142	241	9.9				
5.0	14.7	25.0	138	234	10.0				

Uwaga: Wartości przepuszczalności w układzie SI wyliczono korzystając z następującej zależności:

$$p\left[\frac{\text{m}^2}{\text{Pa}\cdot\text{s}}\right] = 1.699527 \cdot 10^{-8} \cdot p\left[\frac{\text{cm}^4}{\text{G}\cdot\text{min}}\right]$$

Z uwagi na b. małe wartości przepuszczalności podawanej w jedn. SI w tablicy umieszczono wielkości pomnożone przez 10^8

Abbildung 29: Umrechnungstabelle Gasdurchlässigkeitsprüfgerät