



Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen

3-D-Drucken mit einem anorganischen Formstoffsystem

Robert Ramakrishnan

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Die Dissertation wurde am 24.09.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 25.01.2016 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, gilt mein besonderer Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir zugestandene Freiheit bei der Bearbeitung des Themas. Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, ehemaliger Ordinarius des Lehrstuhls, für die herzliche Aufnahme in die utg-Gemeinschaft und die freundliche Einführung am Lehrstuhl bedanken.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth, Ordinarius des Lehrstuhls für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Ordinarius des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Hervorheben möchte ich die Projektpartner bei der voxeljet AG, Friedberg. Sie standen mir stets mit Rat und Tat zur Seite und haben einen großen Anteil an dem Gelingen der experimentellen Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Ebenfalls möchte ich mich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Finanzierung des der Arbeit zugrundeliegenden Forschungsvorhabens bedanken.

Bedanken möchte ich mich herzlich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls sowie den Studierenden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Viele sind zu guten Freunden geworden und so kann ich auf persönlich prägende Jahre und viele freudige Erlebnisse während unserer gemeinsamen Lehrstuhlzeit zurückblicken.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern für die immerwährende Unterstützung durch die ich diese Arbeit mit Zuversicht beginnen und erfolgreich abschließen konnte. Sie haben mir meine Ausbildung ermöglicht, mich stets in allen Lebenssituationen unterstützt und mir die notwendige Stabilität gegeben.

Von ganzem Herzen danke ich Theresa. Mit ihr konnte ich die vielen freudigen Momente teilen und bei ihr in den schwierigen Zeiten Rückhalt und unermüdliche Unterstützung finden.

München, im September 2015

Robert Ramakrishnan

Live as if you were to die tomorrow. Learn as if you were to live forever.

Mahatma Gandhi

Resümee

Additive Fertigungsverfahren sind dabei sich als fester Bestandteil der Produktionstechnik des 21. Jahrhunderts zu etablieren. Die Vorteile dieser Technologie, wie beispielsweise nahezu uneingeschränkte Designfreiheit und werkzeuglose Fertigung, haben zu einer Verbreitung weit über das klassische *Rapid Prototyping* hinaus geführt. Innovative gießereitechnische Betriebe haben dieses Potential bereits früh erkannt. Sie verwenden zunehmend additive hergestellte Modelle, Formen und Kerne und haben deren Einsatz für eine Reihe gießtechnischer Anwendungen in der Branche etabliert. Hierbei spricht man von der *indirekten additiven Fertigung*, da das spätere Bauteil mit einem konventionellen Gießverfahren hergestellt wird. Die nachhaltige und ressourcenschonende Produktion ist eine Herausforderung der alle Gießereien, die in hochindustrialisierten Ländern mit strengen Auflagen zum Umwelt- und Arbeiterschutz produzieren, gegenüberstehen. Organische Bindemittel, wie sie in einer Vielzahl von Gießverfahren eingesetzt werden, sind im Produktionsprozess eines Gussteils ein Hauptverursacher schädlicher Emissionen. Um dieser Herausforderung zu begegnen, setzen vor allem Leichtmetallgießereien zunehmend auf umweltfreundliche, anorganische Bindersysteme. Der Einsatz von anorganischen Bindern zur additiven Herstellung von Formen und Kernen birgt für die Gießereiindustrie große Potentiale. Mithilfe dieser Technologie könnten Gießereien durch innovative Produkte neue Märkte erschließen und diese mit einem nachhaltigen und ressourcenschonenden Produktionsverfahren bedienen.

In der vorliegenden Arbeit wird erstmals ein additives Fertigungsverfahren zur Herstellung anorganisch gebundener Formen und Kerne wissenschaftlich untersucht. Ziel der Arbeit ist es, Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge des Herstellungsprozesses quantitativ und qualitativ zu beschreiben und somit das Prozessverständnis zu erweitern. In einem 3-D-Druckverfahren industriellen Maßstabs wird dazu ein Formstoffsystem auf Basis eines Quarzsandes und eines anorganischen Natriumsilikatbinders verarbeitet. Eine umfangreiche Prozesssteuerung und -überwachung sowie die Anpassung und Weiterentwicklung von Formstoffprüfverfahren stellen die Basis für die Untersuchung hergestellter Prüfkörper dar. Im Rahmen von unabhängigen Versuchsreihen werden ausgewählte Faktoren der einzelnen Prozessschritte variiert und die Veränderungen von relevanten Ausgangsgrößen gemessen und interpretiert. Hierbei kommen der Homogenität der Teileigenschaften innerhalb eines Bauprozesses und der Prozessreproduzierbarkeit besondere Bedeutung zu. Auf Basis der umfangreichen experimentellen Untersuchungen kann für gießrelevante Formstoffeigenschaften ein empirisches Modell erstellt werden. Dies quantifiziert die Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des betrachteten Systems. Durch das gewonnene Prozessverständnis bietet sich die Möglichkeit einen additiv hergestellten, anorganisch gebundenen Formstoff durch eine Anpassung des Produktionsprozesses gezielt auf den jeweiligen Einsatzzweck im nachfolgenden Gießprozess abzustimmen.

Executive Summary

Additive manufacturing methods are establishing themselves as an integral part of 21st century production technology. Specific advantages, such as almost unlimited freedom of design and tool-less production have led to a wide range of applications far beyond classical *rapid prototyping*. Innovative foundries recognized this potential at an early stage. They are increasingly using additively manufactured models, moulds and cores and have established their application for a series of different casting processes in the industry. This is called *indirect additive manufacturing* since the subsequent component is produced by a conventional casting process. A challenge all foundries that produce in highly industrialized countries with strict requirements for environmental and employee protection are facing, is sustainable and resource-friendly production. Organic binders, which are used in a wide variety of casting processes, are a major source of harmful emissions in the production process of a cast part. To meet this challenge, mainly light metal foundries are increasingly shifting their production to environmentally friendly, inorganic binder systems. The use of inorganic binders for additive manufacturing of moulds and cores has great potential for the foundry industry. By applying this method foundries can open up new markets with innovative products and processes which are manufactured by a sustainable and resource efficient production technology.

In the present work an additive manufacturing process for the production of inorganically bound moulds and cores is studied scientifically for the first time. This thesis describes the cause-effect relationships of the manufacturing process both quantitatively and qualitatively, and hereby contributes to the fundamental understanding of the process. Moulding material on the basis of quartz sand and an inorganic sodium silicate binder is processed in an industrial-scale 3-D-printing machine. Extensive process control and monitoring systems, as well as the adaptation and development of mould material test methods are the basis for the analysis of manufactured specimens. In independent series of experiments selected factors of the individual process steps are varied. Subsequently, the effects on relevant output variables are measured and interpreted. Special focus lies on the homogeneity of the part properties within a building process and process repeatability. An empirical model for selected, casting-relevant mould properties is developed on the basis of extensive experimental studies. It quantifies the relationships between the input and output variables of the specified system. The obtained understanding of the process offers the opportunity to alter the properties of an additive manufactured inorganically bound moulding material by adapting the production process parameters. This gives the possibility to meet the particular requirements when applying such moulding materials in a casting process.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzeichenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Formstoffe in der Gießereitechnik	3
2.1.1 Relevante Gießverfahren und Formstoffsysteme	3
2.1.2 Warm- bzw. heißhärtende Alkalisilikatbinder	6
2.2 Additive Fertigung	9
2.2.1 Verfahren und Prinzip	10
2.2.2 3-D-Drucken von Formstoffen	12
2.3 Prüfung und Charakterisierung	17
2.3.1 Physikalische Eigenschaften	17
2.3.2 Mechanische Eigenschaften	18
2.3.3 Geometrische Eigenschaften	20
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	22
4 Experimentelles	23
4.1 Systembeschreibung	23
4.2 Materialspezifikation	25
4.2.1 Formgrundstoff	25
4.2.2 Binder und Additiv	26
4.2.3 Mischprozess	26
4.2.4 Druckfluid	27
4.3 3-D-Drucksystem VX500	27
4.3.1 Positionierungssystem	29
4.3.2 Fluidsystem	29
4.3.3 Materialsystem	31
4.3.4 Heizungssystem	32
4.3.5 Prozesssteuerung und -überwachung	33
4.4 Prozessmodule	36
4.4.1 Pre-Prozess	37
4.4.2 In-Prozess	40
4.4.3 Post-Prozess	44
4.4.4 Quantifizierung der Qualitätsmerkmale	45
4.4.5 Qualitative Bewertung	53
4.5 Versuchsplan	53
4.5.1 Homogenität und Reproduzierbarkeit	53
4.5.2 Faktorenvariation	55
4.5.3 Ergänzende Versuchsreihen	56
5 Ergebnisse	60
5.1 Homogenität und Reproduzierbarkeit	60
5.1.1 Homogenisierung des Energieeintrags	60

5.1.2	Einflüsse der Druckkopfstabilität	62
5.1.3	Bestimmung der In-Prozess-Schüttdichte	63
5.1.4	Charakterisierung des Referenzjobs	64
5.2	Faktorenvariation	67
5.2.1	Binderkonzentration	68
5.2.2	Fluideintrag	71
5.2.3	Energieeintrag	74
5.2.4	Zykluszeit	77
5.2.5	Zeitspanne vor Trocknung	79
5.2.6	Trocknungsdauer	82
5.2.7	Zeitspanne nach Trocknung (Lagerung)	83
5.2.8	Trocknungstemperatur	84
5.3	Ergänzende Versuchsreihen	85
5.3.1	Einfluss der y-Druckrichtung	85
5.3.2	Untersuchung der Anisotropie in z-Richtung	86
5.3.3	Detektion von prozessbedingten Schwachstellen	87
5.3.4	Qualitative Bewertung einer Realgeometrie	89
6	Interpretation	91
6.1	Fehlerbetrachtung	91
6.1.1	Systematische Fehler	91
6.1.2	Zufällige Fehler	92
6.2	Empirische Modellbildung und Diskussion	101
6.2.1	Prozesstemperatur der Scheibenprüfkörper	103
6.2.2	Dichte	105
6.2.3	Permeabilität	107
6.2.4	Festigkeit	109
6.2.5	Feuchtegehalt	112
6.2.6	Prozesstemperatur der Ringprüfkörper	114
6.2.7	Curlneigung	115
6.2.8	Fluidmigration	116
6.2.9	Abrieb	118
6.3	Diskussion der ergänzenden Versuchsreihen	118
6.3.1	Einfluss der y-Druckrichtung	118
6.3.2	Untersuchung der Anisotropie in z-Richtung	119
6.3.3	Detektion von prozessbedingten Schwachstellen	120
6.3.4	Qualitative Bewertung einer Realgeometrie	120
6.4	Bedeutung für den industriellen Einsatz additiv hergestellter Formstoffe	120
7	Zusammenfassung und Ausblick	123
	Anhang	126
	Abbildungsverzeichnis	131
	Tabellenverzeichnis	134
	Literaturverzeichnis	142

Kurzzeichenverzeichnis

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m^2	Durchflossene Fläche
c_B	%	Binderkonzentration
c_B^*	-	Normierte Binderkonzentration
c_{DF}	%	Konzentration des Druckfluids
C^R	-	Curlneigung
C^{R*}	-	Normierte Curlneigung
dx	μm	Voxelabmessung in x-Richtung
dy	μm	Voxelabmessung in y-Richtung
dz	μm	Voxelabmessung in z-Richtung
f_{AKV}	-	Proportionalitätsfaktor im 4-Kugelversuch
f_{DK}	Hz	Arbeitsfrequenz Druckkopf
f_{krit}	-	kritischer f-Wert
F	-	Prüfgröße
$F_{B,AKV}$	N	Bruchkraft im 4-Kugelversuch
E_E	J	Energieeintrag
E_E^*	-	Normierter Energieeintrag
E_F	%	Fluideintrag
E_F^*	-	Normierter Fluideintrag
E_{RQ}	keV	Energie der Röntgenquanten
h_0	-	Null-Hypothese
h_1	-	Hypothese 1
i	-	Schichtzahl
I	Counts	Signalintensität
K	m^2	Permeabilität
K^N	m^2	Permeabilität Normprüfkörper
K^S	m^2	Permeabilität Scheibenprüfkörper
K^{S*}	-	Normierte Permeabilität Scheibenprüfkörper
$K_{ber.}^{S*}$	-	Normierte, berechnete Permeabilität Scheibenprüfkörper
l	m	Durchströmte Länge
m_F	g	Masse von eingetragenen Druckfluid pro Voxel
m^R	g	Masse Ringprüfkörper
$m^{R'}$	g	Masse Ringprüfkörper nach Abriebprüfung
m_S^R	g	Sollmasse Ringprüfkörper
m^S	g	Masse Scheibenprüfkörper
m_{SBS}	g	Masse des SBS pro Voxel
m_T	g	Tropfenmassen
m_{T1-T5}	g	Tropfenmassen bei Messung 1 - 5
$m_{T,IP}$	g	In-Prozess-Topfenmassen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
n	-	Anzahl
n_D	-	Düsenanzahl
n_{FD}	-	Anzahl der fehlerhaft arbeitenden Düsen
n_T	-	Tropfenanzahl
p_1	Pa	Prüfüberdruck
p_2	Pa	Probenüberdruck
p_U	Pa	Umgebungsdruck
P	-	Konfidenz
Q	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Durchfluss
Q_{DK}	%	Druckkopfqualität
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
R_x	DPI	Druckauflösung in x-Richtung
s	-	Standardabweichung
s^2	-	Varianz
S_{DK}	%	Druckkopfstabilität
t_{4KV}	m	Probendicke im 4-Kugelversuch
t_{nT}	h	Zeitspanne nach Trocknung
t_{nT}^*	-	Normierte Zeitspanne nach Trocknung
t_T	h	Trocknungsdauer
t_T^*	-	Normierte Trocknungsdauer
t_{vT}	h	Zeitspanne vor Trocknung
t_{vT}^*	-	Normierte Zeitspanne vor Trocknung
t_W	s	Wartezeit
T_T	K	Trocknungstemperatur
T_T^*	-	Normierte Trocknungstemperatur
t_Z	s	Zykluszeit
t_Z^*	-	Normierte Zykluszeit
$T_{B(L1-L5)}$	°C	Baufeldtemperaturen linker Thermoelemente 1 - 5
$T_{B(R1-R5)}$	°C	Baufeldtemperaturen rechter Thermoelemente 1 - 5
$T_{DK,A}$	°C	Außentemperatur Druckkopf
$T_{DK,I}$	°C	Innentemperatur Druckkopf
T_{IP}	°C	Mittlere In-Prozess-Temperatur
T_{PP}	°C	Mittlere Post-Prozess-Temperatur
V^R	mm^3	Nennvolumen Ringprüfkörper
V^S	mm^3	Nennvolumen Scheibenprüfkörper
v_x	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Druckgeschwindigkeit
x	-	x-Position eines Prüfkörpers
\bar{x}	-	Arithmetisches Mittel von $x_1 - x_n$
y	-	y-Position eines Prüfkörpers

Zeichen	Einheit	Bedeutung
Δm_A^R	%	Abrieb Ringprüfkörper
Δm_A^{R*}	-	Normierter Abrieb Ringprüfkörper
Δm_F^R	%	Fluidmigration Ringprüfkörper
Δm_F^{R*}	-	Normierte Fluidmigration Ringprüfkörper
Δp	Pa	Druckdifferenz
$\Delta p_{1,2}$	Pa	Druckdifferenz von Prüfüberdruck zu Probenüberdruck
ΔT^R	K	Mittlere Prozesstemperatur der Ringprüfkörper
ΔT^{R*}	-	Normierte, mittlere Prozesstemperatur Ringprüfkörper
ΔT^S	K	Mittlere Prozesstemperatur der Scheibenprüfkörper
ΔT^{S*}	-	Normierte, mittlere Prozesstemperatur Scheibenprüfkörper
η	$\mu\text{Pa s}$	Dynamische Viskosität von Luft
ρ^S	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Dichte Scheibenproben
ρ^{S*}	-	Normierte Dichte Scheibenproben
$\rho_{S,SBS}$	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	Nennschüttdichte des SBS
σ_{4KV}	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	Bruchspannung im 4-Kugelversuch
σ_B^S	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Bruchfestigkeit Scheibenprüfkörper
σ_B^{S*}	-	Normierte Bruchfestigkeit Scheibenprüfkörper
ϕ^S	%	Feuchtigkeit Scheibenprüfkörper
ϕ^{S*}	-	Normierte Feuchtigkeit Scheibenprüfkörper
ϕ_{SBS}	%	SBS-Feuchtigkeit
φ_{IP}	%	Mittlere, relative In-Prozess-Luftfeuchtigkeit
φ_{PP}	%	Mittlere, relative Post-Prozess-Luftfeuchtigkeit

1 Einleitung

Additive Fertigung – kaum ein anderer Begriff hat in den vergangenen Jahren im Bereich der Produktionstechnik mehr Aufsehen erregt. Diese Technologie, die auch als generative Fertigung bekannt ist, hält aktuell Einzug in die Wertschöpfungsketten der Luft- und Raumfahrt-industrie, der Medizintechnik sowie des Fahrzeug- und Maschinenbaus. Die Grundlagen für die heute verfügbaren additiven Fertigungsverfahren wurden bereits in den 1980er Jahren gelegt. Aufgrund der zunehmenden Technologiereife in Bezug auf Anlagen, Materialien und Prozesse sowie auslaufender Patente konnte sich im vergangenen Jahrzehnt ein internationaler Markt entwickeln, der jährlich zweistellige Wachstumsraten aufweist. Als eines der zahlreichen Verfahrensvarianten hat sich das pulverbettbasierte 3-D-Drucken (3DP) für eine Reihe von industriellen Anwendungen im Bereich der Prototypen- und Kleinserienfertigung etabliert. 3DP zeichnet sich durch eine große Vielfalt an verarbeitbaren Materialien aus und ermöglicht die additive Herstellung eines Objekts durch schichtweisen Partikelmaterialauftrag und selektiver Verfestigung mithilfe eines verdruckbaren Fluids, welches die designierte Bindungsreaktion lokal aktiviert. Setzt man als Partikelmaterial einen Gießereisand und als Binder ein entsprechendes Harzsystem ein, so lassen sich damit Formen und Kerne für das Sand- und Kokillengießen von metallischen Gussteilen werkzeuglos darstellen. Diese Gießverfahren mit (teilweise) verlorenen Formen ermöglichen die Herstellung von hochkomplexen Bauteilen, die mit umformenden oder subtraktiven Fertigungsverfahren nicht oder nur zeitaufwändig gefertigt werden können. Insbesondere innenliegende Geometriemerkmale, wie konturnahe Kanäle für Betriebsmedien, lassen sich durch Sandkerne, die nach Erstarren des Gussteils zerstört und entfernt werden, realisieren. Um den Belastungen des gesamten Gießprozesses zu widerstehen, müssen Formgrundstoff und Binder, die gemeinsam den Formstoff ausmachen, vielschichtige Anforderungen erfüllen. Als Binder haben sich hier seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts vor allem organische Kunstharze etabliert. Sie ermöglichen in Kombination mit einem geeigneten Formgrundstoff, meist Quarzsand, eine hocheffiziente und vollautomatisierte Form- und Kernfertigung. Unter dem Gesichtspunkt der nachhaltigen und ressourcenschonenden Produktion ist die Verarbeitung von organischen Kunstharzen jedoch kritisch zu betrachten. Organische Bindersysteme beinhalten toxische Verbindungen und erfordern daher bei ihrer Verarbeitung beispielsweise in Kernschießmaschinen besonderen Mitarbeiter- und Umweltschutz. Noch gravierender ist die Umwelt- und Mitarbeiterbelastung beim Abgießen der Formen und Kerne. Hier kommt es zur Verbrennung der organischen Binderbestandteile mit entsprechender toxischer Emissionsbildung. Aufgrund der genannten Problematik haben kohlenwasserstofffreie anorganische Bindersysteme in den vergangenen 10 bis 15 Jahren eine wahre Renaissance erlebt. Obwohl sie in der Gießereitechnik schon seit weit über 100 Jahren bekannt sind, wird ihnen durch ihre hohe Umweltverträglichkeit aktuell sehr großes Interesse zuteil. Durch eine Vielzahl technologischer Weiterentwicklungen in der Binderchemie und -verarbeitung sind die anorganischen Bindersysteme den organischen Bindern (von denen sie einst verdrängt wurden) aus produktionstechnischer Sicht ebenbürtig oder gar überlegen. Diese Entwicklung lässt sich bei zahlreichen deutschen und internationalen Leichtmetallgießereien für Fahrzeugmotorenkomponenten beobachten, die ihre Produktion auf anorganische Bindersysteme umgestellt haben und damit eine technologische Vorreiterrolle in der Branche einnehmen.

Diese wissenschaftliche Arbeit setzt an der Nahtstelle von pulverbettbasiertem 3-D-Druck und anorganischer Bindertechnologie an. Die unterschiedliche chemische Beschaffenheit von organischen und anorganischen Bindern spiegelt sich deutlich in ihrer Verarbeitung und ihren technologischen Eigenschaften, wie beispielsweise Festigkeit, Zähigkeit oder thermischer Stabilität wider. Daher muss bei der Umstellung eines Gießprozesses von einem organischen auf einen anorganischen Formstoffbinder mit tiefgreifenden Konsequenzen entlang der gesamten Prozesskette gerechnet werden. Ziel des der Arbeit zugrunde liegenden Forschungsprojekts war daher die Darstellung von anorganisch gebundenen Formen und Kernen in einem pulverbettbasierten 3-D-Druckprozess. Dies ermöglicht die Bereitstellung anorganisch gebundener Formen und Kerne früh im Produktentstehungsprozess eines Gussteils. Hierdurch kann ein Gießprozess von vornherein für einen anorganischen Binder optimiert und qualifiziert werden, ohne dafür kostenintensive Kernkästen (Werkzeuge für die Kernfertigung auf Kernschießmaschinen) bereitstellen zu müssen. Darüber hinaus kommen sämtliche ökologische, technologische und ökonomische Vorteile der anorganischen Bindersysteme über den gesamten Produktentwicklungs- und Produktionszyklus zur Geltung.

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit beschreibt den Zusammenhang zwischen ausgewählten Prozessparametern (Faktoren) des eingesetzten 3-D-Druckverfahrens und den gussrelevanten Qualitätsmerkmalen der hergestellten Formstoffe. Dazu beleuchtet die Arbeit den Stand der Technik in den relevanten Bereichen der Gießereitechnik und der additiven Fertigung sowie die hier eingesetzten Prüfverfahren. Auf Basis dieser Grundlagen wird das wissenschaftliche Ziel der Arbeit formuliert und das Vorgehen erörtert. Aufgrund des ausgeprägten experimentellen Charakters der Arbeit kommt den verwendeten Materialien und Methoden besonderes Augenmerk zu. Gemeinsam mit dem experimentellen Vorgehen bilden die gewonnenen Ergebnisse den Kern der wissenschaftlichen Arbeit. Sie münden in der Interpretation, die basierend auf einer Fehlerbetrachtung und einer Signifikanzanalyse ein empirisches Modell des Systems einführt. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf mögliche weitergehende Forschungsaktivitäten in diesem Bereich komplettieren die Arbeit.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel gibt zunächst eine Übersicht über die Bedeutung und die Einsatzbereiche von Formstoffen in der Gießereitechnik. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die anorganischen Bindersysteme gelegt, wobei neben den wissenschaftlichen Grundlagen auch die gestiegene, ökonomische Bedeutung dieser Bindersysteme für Gießereibetriebe beleuchtet wird. Darauf folgend überspannt das Kapitel die Grundlagen der additiven Fertigungsverfahren mit seiner rasanten Entwicklung und starken Diversifikation in den letzten Jahren. Von größter Relevanz ist hierbei das pulverbettbasierte 3-D-Drucken, welches für die additive Fertigung von Sandformen eingesetzt wird. Abschließend vermittelt dieser Abschnitt die Grundlagen zu den verwendeten Prüf- und Charakterisierungsmethoden.

2.1 Formstoffe in der Gießereitechnik

Die Gießereitechnik, im Speziellen das Gießen von metallischen Werkstoffen, umfasst nach DIN (2003) das Urformen aus dem flüssigen Zustand (Gruppe 1.1). Innerhalb dieser Gruppe finden sich die verschiedenen Gießverfahren wieder (Untergruppen). In den folgenden Abschnitten werden diejenigen näher betrachtet, bei denen Formstoffe eine wesentliche Rolle spielen.

2.1.1 Relevante Gießverfahren und Formstoffsysteme

Das Fertigungsverfahren Gießen kann dazu dienen sowohl Halbzeuge (Formateguss) als auch endkonturnahe Teile (Formguss) herzustellen (Gobrecht 2009, S. 70). Formstoffe sind ausschließlich für den Formguss von Bedeutung und sind nach Hasse (2008, S. 451) folgendermaßen definiert:

Sammelbezeichnung für alle trockenen, feuchten, pastösen oder flüssigen Stoffe zur Herstellung von Gießformen, die verdichtet, verfestigt oder nach physikalischen Verfahren gebunden werden.

Der Formstoff setzt sich aus dem Formgrundstoff, dem Formstoffbinder und -härter sowie verschiedenen Formstoffzusätzen und Hilfsstoffen (Additiven) zusammen (Bühning-Polaczek et al. 2014, S. 193). Innerhalb des Formgusses unterscheiden Beitz und Küttner (1995, S. 1223) die verschiedenen Gießverfahren nach ihren Formverfahren. Dabei können Formstoffe sowohl zur Darstellung der Außenkontur (Form) als auch zur Realisierung von innenliegenden Konturen (Kern) zum Einsatz kommen. Beispiele für Gießverfahren mit verlorenen Formen, bei denen Formstoffe sowohl für die Außen- als auch die Innenkontur (falls vorhanden) zum Einsatz kommen, sind (Roller 2009, S. 160):

- Sandgießen
- Feingießen
- Vollformgießen
- Maskenformgießen

Bei Gießverfahren mit Dauerformen können Formstoffe als Kerne zum Einsatz kommen. Beispiele für relevante Gießverfahren sind nach Roller (2009, S. 160) das Schwerkraftkokillengießen und das Niederdruckkokillengießen.

Für jedes Gießverfahren, in dem Formstoffe eingesetzt werden, stehen eine Vielzahl an Formstoffsystemen und Verarbeitungsverfahren zur Verfügung. Grundsätzlich lassen sich die Formstoffe nach ihrem Bindungsmechanismus einteilen (Bühning-Polaczek et al. 2014, S. 197). Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht über die bedeutendsten Bindersysteme.

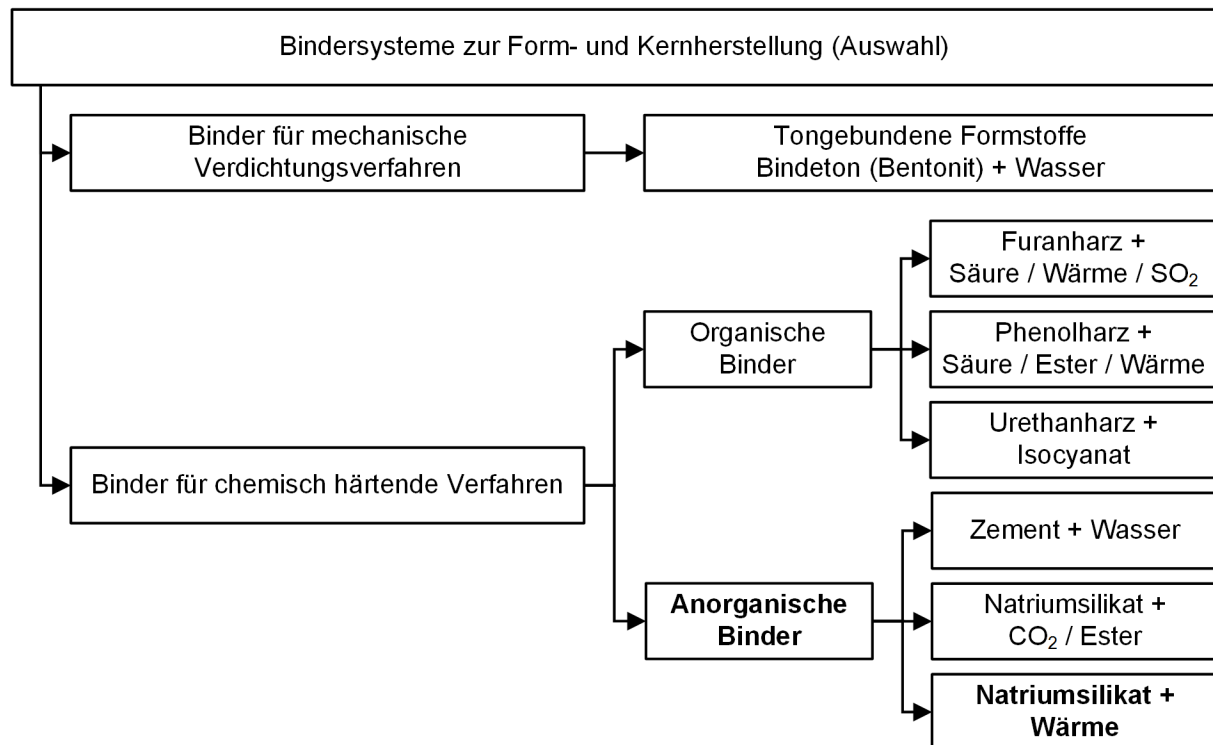


Abbildung 2.1: Übersicht der Bindersysteme zur Form- und Kernherstellung nach Bühning-Polaczek et al. (2014, S. 197). Hervorgehoben ist die Klasse der Binder in die sich das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Bindersystem einordnen lässt.

Je nach Bindungsmechanismus lassen sich Bindersysteme für mechanische Verdichtungsverfahren und für chemisch härtende Verfahren unterscheiden. Im Fall der Bindung durch mechanische Verdichtung kommen tongebundene Formstoffe zum Einsatz. Diese bestehen aus einem körnigen Formgrundstoff (meist Quarzsand), Bindeton, Wasser (zum Quellen des Bindemittels) und Zusatzstoffen. Das bedeutendste Gießverfahren mit dieser Art von Formstoffen ist das Nassgussformverfahren (Grünsandformverfahren). Es zeichnet sich durch niedrige Formstoffkosten, einen hohen Wiederverwendungsgrad des Umlaufformstoffs und die Möglichkeit zur Schaffung weitgehend geschlossener Stoffkreisläufe aus (Flemming und Tilch 1993, S. 135).

Eine detaillierte Übersicht über Entwicklung und Bedeutung der chemisch gebundenen Formstoffe gibt Wolff (2009). Die Bindungsreaktion von organischen Bindern kann sowohl durch einen Härter als auch durch thermische Energie in Gang gesetzt werden. Im Falle einer kalten Härtung kann man furan- und phenolharzgebundene Formstoffsysteme zu den sog. Kaltharz-

verfahren zusammenfassen (Bühring-Polaczek et al. 2014, S. 213). Für das Sandgießverfahren hat die Gruppe der Kaltharz binder die größte Bedeutung. Hier wird das Kaltharzverfahren bevorzugt für mittlere bis große Gussteile im Massebereich von 0,5 bis 5 t für die Einzel- und Serienfertigung eingesetzt (Flemming und Tilch 1993, S. 288). Urethanharz binder kommen vor allem im Bereich der Großserienproduktion von kernintensiven Gussteilen für den Fahrzeugmotorenbau zum Einsatz. Derart gebundene Kerne finden sowohl Anwendung in verlorenen Formen als auch in Gießverfahren mit Dauerformen wie dem Schwerkraft- und Niederdruckkokillengießen. Das bedeutendste Kernherstellungsverfahren innerhalb dieser Binderklasse ist das Polyurethan(PUR)-Cold-Box-Verfahren. Der Anteil der mit diesem Verfahren maschinell hergestellten Kerne beträgt in Deutschland zwischen 60% und 70% (Bühring-Polaczek et al. 2014, S. 217). Neben der Härtung durch einen chemischen Aktivator können organische Binder ebenfalls durch Wärme verfestigt werden. Die bedeutendsten Verfahren in diesem Bereich sind das Hot-Box- und das Maskenformverfahren (Hasse 2008, 598 u. 811). Beide Verfahren arbeiten mit öl- oder elektrisch beheizten, metallischen Werkzeugen. Das Hot-Box-Verfahren arbeitet, ähnlich wie das Cold-Box-Verfahren, mit einem feuchten Formstoffgemisch. Bei dem Maskenformverfahren (Croningverfahren) kommt hingegen ein harzumantelter Formgrundstoff zum Einsatz. Hier wird das Harz während der Form- bzw. Kernherstellung zunächst aufgeschmolzen und bei Temperaturen von ca. 250 - 300°C vernetzt (Drossel 1999, S. 315).

Die zweite Gruppe der chemisch härtenden Verfahren machen die anorganischen Bindersysteme aus. Nach Polzin (2012, S. 42) lassen sich die anorganischen Form- und Kernherstellungsverfahren folgendermaßen einteilen:

- Gashärtende Formverfahren
- Kaltselfthärtende Verfahren
- Warm- bzw. heißhärtende Verfahren

Die älteste (Patentierung 1947) und gleichzeitig bedeutendste Technologie innerhalb der gashärtenden, anorganischen Formverfahren ist das Wasserglas-CO₂-Verfahren. Die Härtung des Formstoffs erfolgt durch das Begasen mit CO₂ oder Luft bei Raumtemperatur. Mit der Entwicklung der zuvor beschriebenen organischen Bindersysteme, insbesondere dem PUR-Cold-Box-Verfahren, wurde es jedoch aus Großserienanwendungen verdrängt. Aufgrund seiner hohen Flexibilität und geringer Anlagen- und Werkzeugkosten findet das Wasserglas-CO₂-Verfahren oftmals noch bei Kundengießereien mit stark wechselndem Produktionsprogramm und unterschiedlichen Losgrößen Anwendung (Flemming und Tilch 1993, S. 326).

Kaltselfthärtende Verfahren kommen hauptsächlich bei der Herstellung von Gussteilen mit einem Gussgewicht von über einer Tonne zum Einsatz. Tongebundene Formstoffsysteme können den hohen mechanischen und thermischen Lasten, die bei der Herstellung solcher Gussteile auf die Form wirken, nicht mehr standhalten (Polzin 2012, S. 73). Die kaltselfthärtenden Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass der Formstoffmischung unmittelbar vor der Verarbeitung zu Form oder Kern ein Härter beigemischt wird. Die Härtung erfolgt selbständig und bei Raumtemperatur. Aushärtezeiten hängen von der Formgröße und der chemischen Zusammensetzung des Formstoffgemischs ab. Der Abguss einer solchen Form erfolgt in der Regel

innerhalb von 24 Stunden. Das anorganische Pendant zu den organischen, kaltselbsthärtenden Verfahren (vgl. Kaltharzverfahren) ist das Wasserglas-Ester-Verfahren. Die Härtung des Wasserglasbinders erfolgt hierbei über die Zugabe eines organischen Esters wie beispielsweise Essigsäureester. Im Bereich der kaltselbsthärtenden Verfahren nehmen jedoch die organischen Kaltharzverfahren mit einem aktuellen Produktionsanteil von ca. 90% die bedeutendste Stellung ein (Bühning-Polaczek et al. 2014, S. 215). Das Zementformverfahren, als zweiter Vertreter der anorganisch kaltselbsthärtenden Verfahren, nimmt ebenfalls eine Nischenstellung ein. Der bekannteste Anwendungsfall ist bei der Herstellung von Schiffspropellern aus Aluminiumbronze (Bühning-Polaczek et al. 2014, S. 216).

Die dritte Gruppe der anorganischen Bindersysteme, die Warm- bzw. heißhärtenden Verfahren, werden vor allem bei der Herstellung von Kernen für den Leichtmetallkokillenguss verwendet. Auf der weltgrößten Gießereifachmesse GIFA stellten im Jahre 2003 erstmals eine Reihe von Bindemittelherstellern ihre anorganisch, heißhärtenden Systeme vor (Polzin 2007). Diese Formstoffsysteme haben inzwischen das PUR-Cold-Box-Verfahren aus zahlreichen OEM-Gießereien verdrängt. Sie entwickeln sich zum Stand der Technik im Bereich Leichtmetallkokillenguss von Fahrzeugmotorenkomponenten, wie beispielsweise Zylinderköpfen oder Kurbelgehäusen, die in Großserie hergestellt werden (Weissenbek et al. 2011). Abbildung 2.2 zeigt einen Wassermantelkern eines 6-Zylinder-Kurbelgehäuses, der mit einem anorganisch, heißhärtenden Verfahren hergestellt wurde.

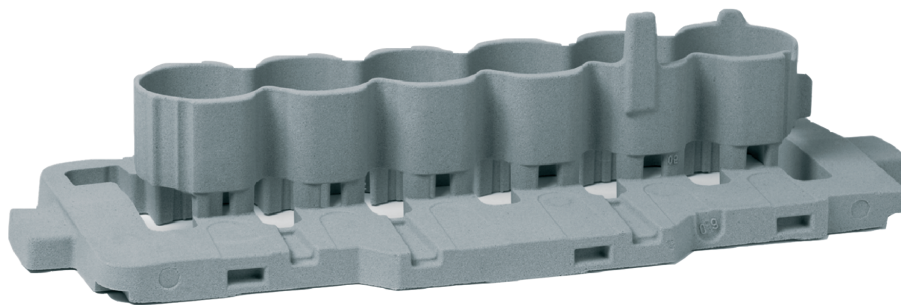


Abbildung 2.2: Wassermantelkern eines 6-Zylinder-Kurbelgehäuses, der mit einem anorganisch, heißhärtenden Verfahren hergestellt wurde (Müller 2007)

Warm- bzw. heißhärtende Alkalisilikatbinder stellen innerhalb der anorganischen Bindersysteme aktuell die bedeutendste Gruppe für die Gießereiindustrie dar. Das in dieser Arbeit verwendete System ist ebenfalls dieser Bindergruppe zuzuordnen, weshalb sie im folgenden Abschnitt detailliert erläutert wird.

2.1.2 Warm- bzw. heißhärtende Alkalisilikatbinder

Aktuelle Bedeutung für die Gießereiindustrie

Bei der Herstellung von metallischen Gussteilen müssen zahlreiche gesundheits- und umwelttechnische Fragestellungen berücksichtigt werden. Feßmann und Orth (2002, S. 78) fassen die kritischsten Punkte zusammen:

- Emissionen aus Schmelzöfen

- Gesundheitsschädliche Einsatzstoffe bei der Formen- und Kernmacherei
- Emissionen beim Aushärten der Formen bzw. Kerne und Abgießen des flüssigen Metalls
- Emissionen beim Entformen, der Sandaufbereitung und dem Putzen der Gussstücke
- Abfälle durch verlorene Sandformen und -kerne (Altsande)

Aus dieser Zusammenstellung wird deutlich, dass die verwendeten Formstoffe in einer Gießerei einen bedeutenden Anteil der Umwelt- und Mitarbeiterbelastung verursachen können. Grefhorst (2011) stellt fest, dass ca. 90% der gefährlichen, luftkontaminierenden Stoffe, die in einer Eisengießerei freigesetzt werden, durch den Formstoff verursacht werden. Die Hälfte dieser Emissionen kann auf organisch gebundene Kerne zurückgeführt werden. Von Seiten der Politik wurde auf diese Umstände im Jahre 2008 im Rahmen einer neuen CLP (Classification, Labelling and Packaging) Verordnung (Nr. EG 1272/2008) für gießereirelevante Chemikalien reagiert. Die Regelung sieht beispielsweise vor, dass Amine (Härter beim PUR-Cold-Box-Verfahren) als *giftig* statt *gesundheitsschädlich* eingestuft werden. Furfurylalkohol, welches als Härter beim Furanharzverfahren eingesetzt wird, gilt demnach als *giftig* und *krebsverdächtig* (Psimenos und Eder 2011). Aufgrund dieser Rahmenbedingungen müssen Gießereien entsprechende Maßnahmen zum Umwelt- und Arbeiterschutz beim Umgang mit den erwähnten Stoffen beachten. Alternativ bietet sich die Umstellung des Formstoffs auf ein anorganisches Bindersystem an. Nach Pabel (2009) und Becker et al. (2014) zeigen sich beim Serieneinsatz eines heißhärtenden Alkalisilikatbindersystems in einer Leichtmetallkokillengießerei Vorteile in den folgenden Bereichen:

- Ökologie: keine Emissionen bei der Kernfertigung, emissionsarm beim Abguss
- Qualität: keine Kondensatanhaftung am Gussteil, geringerer Putzaufwand
- Ökonomie: geringe Verschmutzung von Kernkasten und Kokille, daher hohe Verfügbarkeit und Standzeit der Werkzeuge und höhere Gießausbringung
- Technologie: verbesserte Werkstoffeigenschaften durch weniger Porosität im Gussteil und feineres Gefüge durch stärkere Kokillenkühlung

Die genannten Vorteile unterstreichen die Bedeutung dieser Bindersysteme für die Gießereiindustrie. Es ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft anorganische Bindersysteme angesichts des Bestrebens nach ressourcenschonender und nachhaltiger Produktion eine wichtige Rolle spielen werden.

Chemische Grundlagen

Die Bezeichnung *Wasserglas* wird für glasartig erstarrte Schmelzen von Alkalisilikaten unterschiedlicher Zusammensetzungen sowie für deren Lösungen verwendet (Brunhuber 1970, S. 641). Innerhalb der Alkalisilikate hat das Natriumsilikat als Bindemittel in der Gießereiindustrie die größte Bedeutung erlangt (Flemming und Tilch 1993, S. 78). Daher wird im Folgenden ausschließlich auf diese Verbindungen weiter eingegangen. Das wichtigste Verfahren zur

Herstellung von Natriumsilikaten ist das Schmelzverfahren. Dabei werden hochreiner Quarzsand und Natriumkarbonat bei 1300°C bis 1500°C zu Natriumsilikat verschmolzen (Polzin 2012, S. 14). Das entstandene Natriumsilikat kann als Feststoff oder als Silikatbinder in Wasser gelöst vorliegen. Abbildung 2.3 veranschaulicht die Reaktion bei der Herstellung von Natriumsilikat nach Wallenhorst (2010).

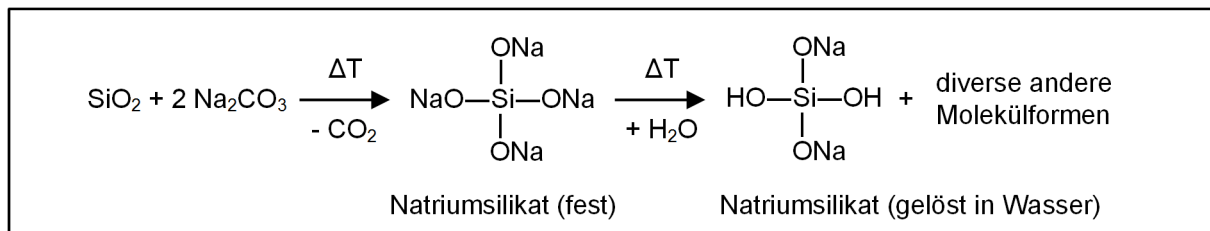


Abbildung 2.3: Herstellung von einem Natriumsilikatbinder aus Quarz (SiO_2) und Natriumkarbonat (Na_2CO_3) nach Wallenhorst (2010)

Soll Natriumsilikat als Feststoff gewonnen werden, erfolgen nach der Synthese eine schlagartige Abkühlung und ein Mahlprozess. Bei erhöhter Temperatur kann das feste Wasserglas in Wasser gelöst werden. Eine Klassifizierung der Natriumsilikatbinder erfolgt über das Molverhältnis von Siliziumdioxid (SiO_2) zu Natriumoxid (Na_2O), welches als Modul bezeichnet wird. Der Modul ist für die technologischen Eigenschaften des Binders, wie beispielsweise Reaktivität, Festigkeit und Lagerfähigkeit von entscheidender Bedeutung und muss auf das jeweilige Verarbeitungsverfahren abgestimmt werden (Flemming und Tilch 1993, S. 80). Für die Gießertechnik relevante Natriumwassergläser haben nach Polzin (2012, S. 17) meist einen Modul zwischen 2,0 und 3,3. Erfolgt die Aushärtung des Binders durch Dehydratisierung mittels thermischer Energie, so kommt es zu der in Abbildung 2.4 gezeigten Kondensationsreaktion nach Wallenhorst (2010) und Iler (1979, S. 174).

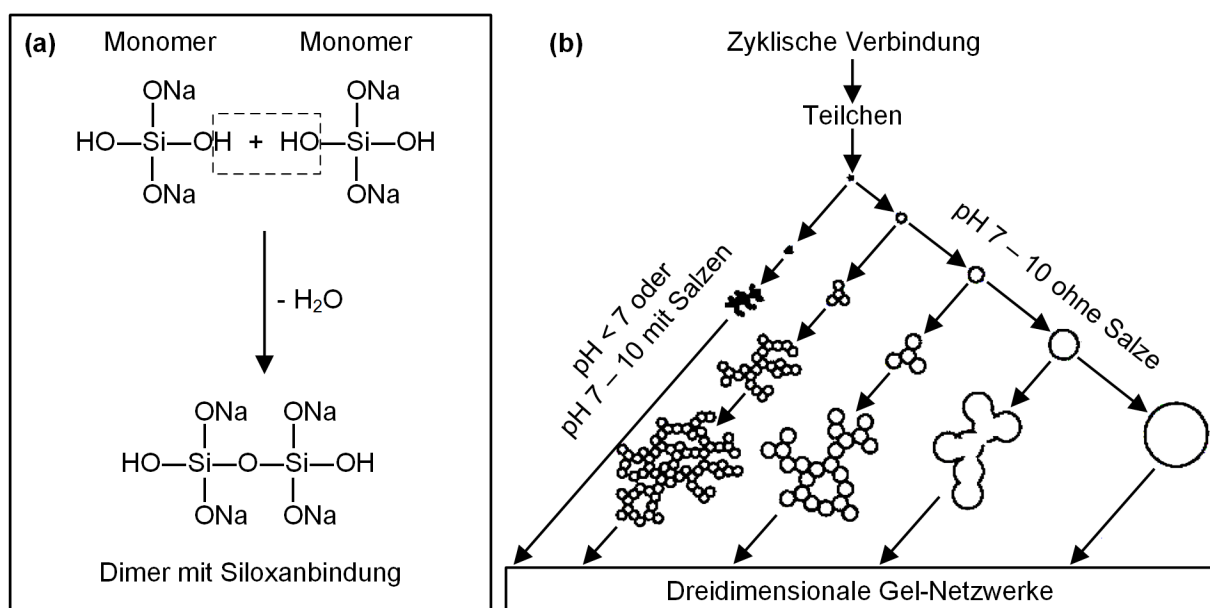


Abbildung 2.4: Aushärtung eines Natriumsilikatbinders durch thermisch aktivierte Dehydratisierung nach Wallenhorst (2010) und Iler (1979, S. 174)

Unter Abspaltung von Wasser, welches dem System durch thermische Energie entzogen wird, kommt es zu einer Kondensationsreaktion zwischen den einzelnen Monomeren. Dabei bilden sich Siloxanbindungen (Si-O-Si) zwischen zwei Siliziumatomen aus (a). Über weitere Kondensation (b) bilden sich zunächst zyklische Strukturen und anschließend Teilchen. Abhängig vom pH-Wert und der An- bzw. Abwesenheit von Salzen kommt es entweder zur Vergrößerung der Partikel (pH 7 - 10 ohne Salze) oder zur Ausbildung von dreidimensionalen Gel-Netzwerken (pH < 7 oder pH 7 - 10 mit Salzen). Der chemische Reaktionsmechanismus - Polykondensation und Bildung von Siloxanbindungen - ist in beiden Fällen identisch. Diese Gelnetzwerke formen schließlich bei ihrer Aushärtung die Binderbrücken zwischen den einzelnen Sandpartikeln (Polzin 2012, S. 20). Die Morphologie des sich ausbildenden Bindernetzwerks und damit auch die technologischen Eigenschaften des gebundenen Formstoffs hängen noch von einer Reihe weiterer Faktoren ab. Wallenhorst (2010) und Flemming und Tilch (1993, S. 83) nennen die Folgenden:

- Angewendetes Härtingsverfahren
- Geschwindigkeit der Reaktionsführung
- Anwesenheit von zusätzlichen Netzwerkbildnern (Promotoren)
- Molverhältnis der Wasserglaslösung
- Binderanteil in der Formstoffmischung

Bei der Härtingsreaktion entstehen Siloxanbindungen sowohl zwischen den Sandkörnern und der Binderhülle als auch innerhalb der Binderbrücken zwischen den Sandkörnern. Die bindende Wirkung ist demzufolge sowohl auf Adhäsions- als auch auf Kohäsionskräfte zurückzuführen. Erfolgt die Verfestigung durch thermische Aktivierung (Warm- bzw. heißhärtende Alkalisilikatbinder) ist die Belastbarkeit des Kornverbandes besonders an der Grenzfläche zwischen Korn- und Binderhülle wesentlich stärker als bei einer chemischen Härtereaktion (Flemming und Tilch 1993, S. 83). Jelinek und Polzin (2003) stellen detaillierte Untersuchungen an der Struktur und den Festigkeitseigenschaften von Natriumsilikatbindern, die mittels unterschiedlicher Methoden verfestigt wurden, vor und bestätigen diese Erkenntnisse. Sie begründen die höhere Festigkeit der thermisch dehydrierten Binder mit kleineren Teilchen im Gel und dem Fehlen von negativ wirkenden Nebenprodukten der chemischen Aushärtung. Diese chemischen Nebenprodukte, beispielsweise Natriumkarbonat, verursachen nach Stachowicz et al. (2010) Risse in der Binderstruktur und vermindern somit die Festigkeit.

2.2 Additive Fertigung

Bei der Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 werden additive Fertigungsverfahren nicht explizit erwähnt (DIN 2003). Dieser Umstand beruht darauf, dass bei der additiven Herstellung eines Teils unterschiedliche Gruppen von Fertigungsverfahren nach DIN 8580 in einem schichtweisen Herstellungsprozess angewendet werden. Somit können additive Fertigungsverfahren beispielsweise dem *Urformen aus dem flüssigen Zustand (Gruppe 1.1)*, dem

Urformen aus dem plastischen Zustand (Gruppe 1.2) oder dem Fügen durch Schweißen (Gruppe 4.6) zugeordnet werden (Berger et al. 2013, S. 10). Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht der industriell relevanten, additiven Fertigungsverfahren und erläutert das grundlegende Prinzip des schichtweisen Aufbaus. Anschließend werden die notwendigen Grundlagen des im Rahmen der Arbeit angewendeten 3-D-Druckenverfahrens von Formstoffen vermittelt.

2.2.1 Verfahren und Prinzip

Gebhardt (2013, S. 6) gliedert die verschiedenen additiven Fertigungsverfahren nach dem jeweiligen Anwendungszweck des hergestellten Objekts. Demzufolge unterscheidet er zwischen dem *Rapid Prototyping*, welches zur Herstellung von Prototypen und Anschauungsmodellen dient und dem *Rapid Manufacturing*. Letzteres umfasst die generative Herstellung von Produkten. Die Herstellung von Formen, Werkzeugen oder Werkzeugeinsätzen wird unter dem Begriff *Rapid Tooling* zusammengefasst. Die Vielzahl an Begrifflichkeiten im Bereich der additiven Fertigung ordnet die VDI-Richtlinie 3405. Die in dieser VDI-Richtlinie verwendeten, englischsprachigen Begriffe entstammen dem ASTM-Standard F2792-12a (ASTM 2013). Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die kommerziell etablierten additiven Fertigungsverfahren nach VDI (2014) und den jeweils verarbeitbaren Materialien.

Tabelle 2.1: Etablierte additive Fertigungsverfahren und verarbeitbare Materialien (VDI 2014)

Verfahren	Papier	Kunststoff	Formsand	Metall	Keramik
Stereolithografie (SL)		x			x
Laser-Sintern (LS)		x	x	x	x
Laser-Strahlschmelzen (LBM)				x	
Elektronen-Strahlschmelzen (EBM)				x	
Fused Layer Modelling (FLM)		x			
Multi-Jet Modelling (MJM)		x			
Poly-Jet Modelling (PJM)		x			
3-D-Drucken (3DP)		x	x	x	x
Layer Laminated Manufacturing (LLM)	x	x		x	x
Digital Light Processing (DLP)		x		x	x
Thermotransfer-Sintern (TTS)		x			

Die Einteilung verdeutlicht, dass je nach eingesetztem Material ein Verfahren sowohl dem *Rapid Prototyping*, dem *Rapid Tooling* als auch dem *Rapid Manufacturing* zugeordnet werden kann. Als Beispiel hierfür gilt das Verfahren des 3-D-Druckens. Wird ein Kunststoff im 3-D-Drucker verarbeitet, so kann beispielsweise ein prototypisches Funktionsmodell einer Vakuumpumpe hergestellt werden (Gandert 2014). Ederer (2004) beschreibt den Einsatz von einem 3-D-Druckverfahren zur werkzeuglosen Herstellung von Sandgussformen. Ebenfalls können in einem 3-D-Drucker metallische oder keramische Pulver eingesetzt werden, welche die Herstellung von serientauglichen Funktionsteilen ermöglichen (Gebhardt 2013, S. 270).

Im Vergleich mit anderen Fertigungstechnologien haben die additiven Verfahren noch eine verhältnismäßig junge Entwicklungsgeschichte. Eines der ersten Patente in diesem Bereich geht auf das Jahr 1986 zurück. Hier stellte Hull (1986) eine *Anlage zur Produktion von dreidimen-*

sionalen Objekten mittels Stereolithographie vor. Abbildung 2.5 zeigt das Anlagenschema aus dem genannten Patent sowie das grundsätzliche Prinzip der generativen Fertigung nach Gebhardt (2013, S. 25).

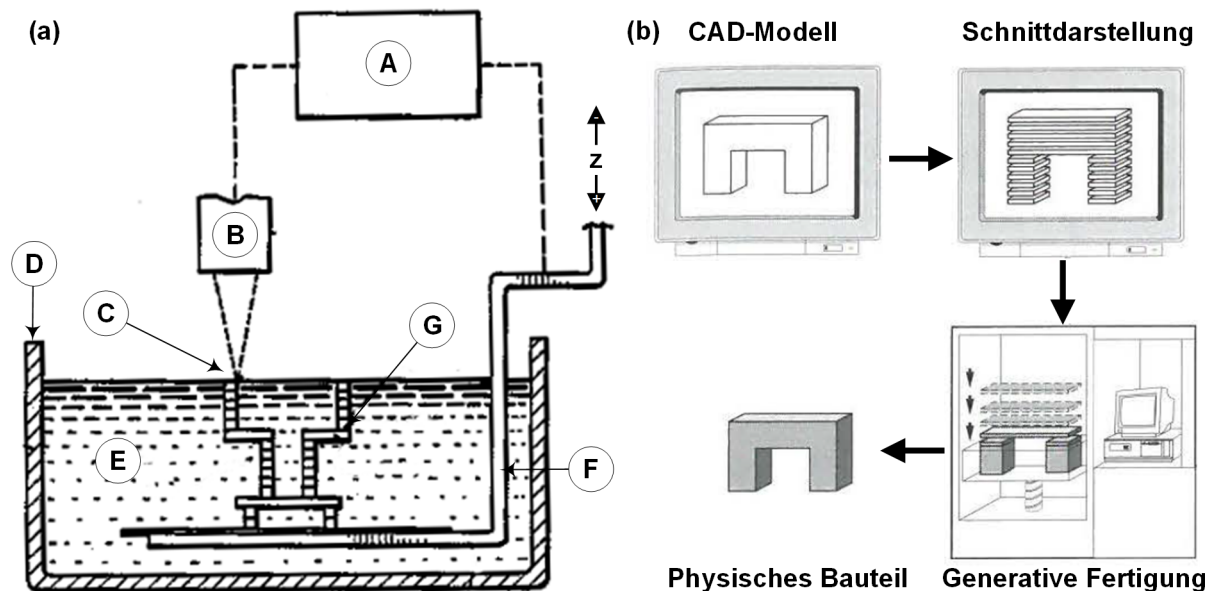


Abbildung 2.5: Anlagenschema des Stereolithographieprozesses (a) nach Hull (1986). A = Steuerrechner, B = UV-Lichtquelle, C = Brennpunkt, D = Behälter, E = Photopolymer, F = Höhenverstellbare Plattform, G = Verfestigtes Objekt. Prinzip der generativen Fertigung (b) nach Gebhardt (2013, S. 25)

Das gezeigte Stereolithographieverfahren beruht auf der lokalen Verfestigung eines UV-aktiven Photopolymers. Die designierten Bereiche einer Schicht werden belichtet und dadurch ausgehärtet. Anschließend senkt sich die höhenverstellbare Plattform um den Betrag der Schichtstärke ab, sodass die verfestigten Bereiche in das Polymerbad eintauchen. Der Aushärtungs- und Absenkprozess wird solange wiederholt, bis das Objekt fertiggestellt ist. Die Information, welche Bereiche einer Schicht verfestigt werden sollen, wird aus der virtuellen Schnittdarstellung eines CAD-Modells abgeleitet. Diese Information wird an die Anlage übergeben, die vollautomatisiert die Fertigung des physischen Bauteils übernimmt. Der Großteil der heutzutage kommerziell etablierten additiven Fertigungsverfahren (vgl. Tabelle 2.1) basiert auf diesen grundlegenden Verfahrensschritten des schichtweisen Materialauftrags. Die Hauptunterschiede der Verfahren liegen in den verarbeitbaren Materialien, der Art des Schichtauftrags sowie der Methode mit der die einzelnen Schichten verfestigt und miteinander verbunden werden. Diese Unterschiede spiegeln sich in der Geschwindigkeit, den Kosten und der Größe der Anlagen sowie den Eigenschaften der hergestellten Teile wider (Gibson et al. 2015, S. 2). Ebenso führen die zahlreichen verfügbaren Verfahren zu einem sehr breiten Anwendungsfeld für additiv hergestellte Teile. Conner et al. (2014) empfehlen vor dem Einsatz einer generativen Technologie das betreffende Teil in Bezug auf seine Komplexität, Individualität und Stückzahl zu analysieren. Somit lassen sich technologisch und wirtschaftlich sinnvolle Anwendungsbereiche identifizieren. Einer dieser Anwendungsbereiche ist das 3-D-Drucken von Formstoffen für gießtechnische Anwendungen, welches im Folgenden näher beschrieben wird.

2.2.2 3-D-Drucken von Formstoffen

Verfahrensgrundlagen

Der Einsatz von additiven Fertigungsverfahren im Gießereibereich wird in der Literatur auch als *Rapid Casting* oder *indirekte additive Fertigung* bezeichnet. Diese Bezeichnungen beruhen auf der Tatsache, dass ein additiv hergestelltes Teil sowohl ein Modell als auch eine Form bzw. ein Kern darstellen kann (Karunakaran et al. 2012). In beiden Fällen schließt sich an den additiven Prozess ein konventioneller Gießprozess an. Im Folgenden soll nur die additive Herstellung von Formen und Kernen aus gießereüblichen Formgrundstoffen weiter betrachtet werden.

Das generative Herstellen von Formen und Kernen für gießtechnische Anwendungen wurde erstmals in einem Patent des Massachusetts Institute of Technology aus dem Jahr 1990 erwähnt. E. Sachs et al. (1990) beschreiben das schichtweise Ablagern eines benetzten, partikelförmigen Materials (beispielsweise Sand mit einem organischen Binder) und das selektive Bedrucken dieses Materials mit Hilfe eines Tintenstrahldruckkopfs. Als Verfestigungsmechanismus wird die chemische Reaktion von dem organischen Binder mit dem tröpfchenweise eingetragenen Aktivator beschrieben. Nicht verfestigter Sand kann nach Beendigung des Druckprozesses von der ausgehärteten Form durch Abblasen entfernt werden. Abbildung 2.6 zeigt schematisch die einzelnen Schritte bei der Herstellung einer Gussform mittels pulverbettbasiertem 3-D-Drucken (Berger et al. 2013, S. 73).

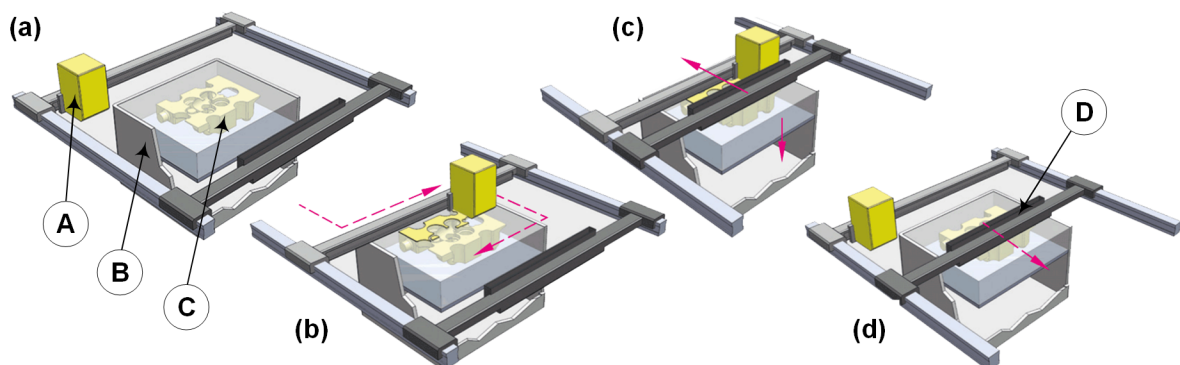


Abbildung 2.6: Verfahrensschritte bei der Herstellung einer Sandgussform mittels 3-D-Drucken. Drucker in Ausgangsstellung (a) mit A = Druckkopf, B = Behälter und C = Sandform. Mäanderförmiges Bedrucken des Baufelds (b), Absenken des Baufelds (c) und Auftragen der nächsten Sandschicht (d) mit D = Beschichter (Berger et al. 2013, S. 73).

Innerhalb der Anlage befindet sich der Behälter (Jobbox) mit einer höhenverstellbaren Grundplattform, die mit dem Formgrundstoff bedeckt ist. Der Druckkopf trägt selektiv den flüssigen Aktivator auf die zu verfestigenden Bereiche der aktuellen Schicht auf. Nach dem Drucken erfolgt das Absenken des gesamten Pulverbetts um die Schichtstärke und das erneute Auftragen einer Schicht des Formgrundstoffs. Dieser Zyklus wird bis zur Fertigstellung der Sandform oder des Kerns wiederholt.

Die bei der additiven Herstellung von Sandformen und -kernen eingesetzten Formstoffsysteme basieren auf den gießereüblichen Formgrundstoffen und Bindern (vgl. Abschnitt 2.1.1). Die Verarbeitung eines Formstoffsystems in einem 3-D-Drucker bringt jedoch zusätzliche Anfor-

derungen mit sich. Dies betrifft insbesondere die Rieselfähigkeit des Formstoffgemischs und die Verdruckbarkeit des Aktivators (Gebhardt 2013, S. 274). Das Partikelmaterial muss während des Herstellungsprozesses beispielsweise über Vakuumleitungen, Förderschnecken und einen vibrierenden Beschichter auf das Baufeld befördert werden. Diese unterschiedlichen Förderprozesse benötigen eine exakte Abstimmung zwischen Material und Prozess, um eine prozesssicheren Schichtauftrag des Partikelmaterials zu erreichen (Spath und Seitz 2014). Neben dem Formgrundstoff stellt auch die zu verdruckende Flüssigkeit (Aktivator) besondere Ansprüche an den 3-D-Druckprozess. Zum einen muss sie die designierte chemische Aushärtungsreaktion bei Kontakt mit dem Formstoffgemisch in Gang setzen. Zum anderen muss sie prozesssicher in einem Piezodruckkopf zu verarbeiten sein. Der Großteil der derzeit industriell eingesetzten Formstoffdrucker arbeiten mit Bindersystemen auf Furanharzbasis (Stankiewicz et al. 2010). Hinzu kommen neuere Systeme, die auf Phenolharzbasis (Königsreuther 2014) und Silikatbasis (Quitter 2011) arbeiten. Piezodruckköpfe stellen den Stand der Technik für das 3-D-Drucken von Formstoffen dar, da sie in der Lage sind, sowohl wasserbasierte als auch nicht wasserbasierte Medien zu verdrucken. Sie arbeiten nach dem Prinzip der intermittierenden Tropfengenerierung (*engl.: Drop-On-Demand DOD*), bei dem eine Vielzahl einzelner Kapillardüsen signalgebunden einzelne Tropfen erzeugt (Clements 2006, S. 454). Diese Drückkopfart zeichnet sich durch ihre Langlebigkeit sowie durch ihre hohe Arbeitsfrequenz und die damit verbundene hohe Druckgeschwindigkeit aus. Ebenfalls bietet sie die Möglichkeit Tropfengröße und Tropfenanzahl gezielt einzustellen (Tropfenmodulation) (Berger et al. 2013, S. 99). Abbildung 2.7 zeigt den schematischen Aufbau und die Funktionsweise einer Piezodüse eines DOD Druckkopfs.

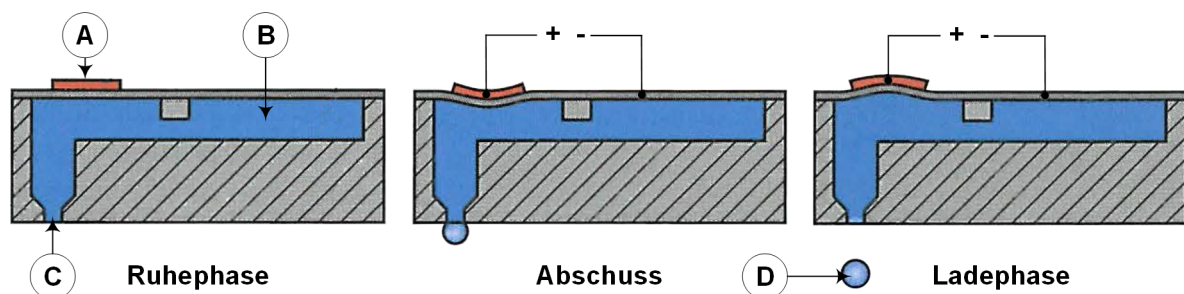


Abbildung 2.7: Phasen der intermittierenden Tropfengenerierung mittels einer Piezodüse nach Berger et al. (2013, S. 98). A = Piezoplättchen, B = Flüssigkeitskanal, C = Düsenöffnung und D = Tropfen.

Im spannungsfreien Zustand (Ruhephase) verbleibt das Fluid durch Kapillarkräfte und ggf. einen leichten Unterdruck im Fluidsystem innerhalb der Düse. Wird das Piezoplättchen mit einer Spannung beaufschlagt, so reagiert es mit einer Verformung, die in einer schlagartigen Volumenverkleinerung des Flüssigkeitskanals resultiert. Die hierbei erzeugte Druckwelle presst einen Tropfen mit hoher Geschwindigkeit (mehrere Meter pro Sekunde) aus der Düse. Das anschließende Anlegen einer gegenpoligen Spannung ruft eine Volumenvergrößerung im Fluidkanal hervor, die zum definierten Abriss des Tropfens und schnellem Nachfließen des Druckfluids führt. Der Zyklus einer solchen Tropfenerzeugung nimmt weniger als $60 \mu\text{s}$ in Anspruch (Berger et al. 2013, S. 98). Die Integration von mehreren, einzeln ansteuerbaren Piezodüsen in

einem Druckmodul und die Verschaltung mehrerer Module zu einem Druckkopf bieten große Potentiale zur Aufskalierung dieses Druckverfahrens.

Betrachtet man die Anforderungen an konventionell hergestellte, kaltharzgebundene Formen, so weisen 3-D-gedruckte Sandgussformen in vielerlei Hinsicht vergleichbare Eigenschaften auf. Snelling (2015) führt diesen Vergleich für ein Furanharzsystem durch. Er stellt fest, dass additiv hergestellte, furanharzgebundene Formen in Bezug auf ihre Zugfestigkeit die konventionell hergestellten Formen übertreffen. Im Rahmen seiner Untersuchungen durchgeführte Gießversuche mit einer A356 Aluminiumlegierung zeigen keine signifikanten Unterschiede in der Mikrostruktur, der Porosität und der Zugfestigkeit von gegossenen Probekörpern.

Bedeutung für die Gießereiindustrie

Die zuvor beschriebene Skalierbarkeit des 3-D-Druckprozesses ermöglichte die Entwicklung von großformatigen, leistungsfähigen und wirtschaftlich arbeitenden 3-D-Druckern, wie sie aktuell immer stärkere Verbreitung in der Gießereiindustrie finden. Auf der Grundlage des im vorhergehenden Abschnitts dargestellten Prinzips haben verschiedene Anlagenhersteller leistungsfähige Produktionsanlagen für die additive Herstellung von Gussformen entwickelt und vermarktet. Abbildung 2.8 zeigt eine fotografische Aufnahme des Innenraums des derzeit größten 3-D-Druckers für Gussformen. Hierbei handelt es sich um den Anlagentyp VX4000 der voxeljet AG, Friedberg.

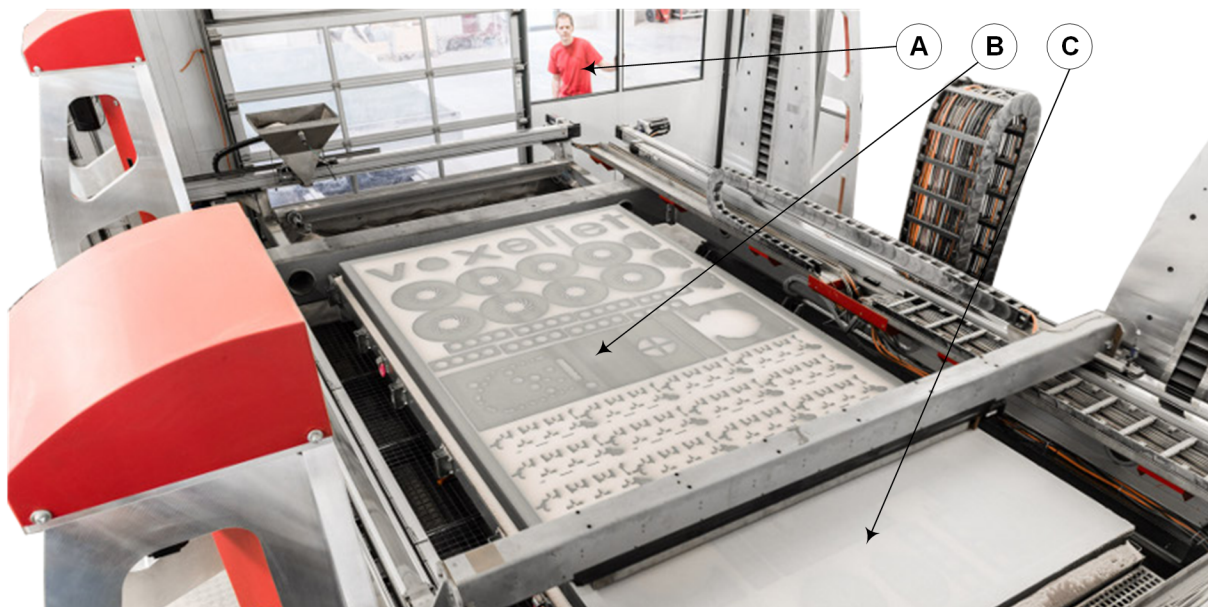


Abbildung 2.8: Innenansicht eines voxeljet VX4000 3-D-Druckers (voxeljet AG 2015). A = Bediener, B = Bedruckte Fläche, C = Unbedruckte Fläche.

Der nutzbare Bauraum dieses Anlagentyps beträgt 8 m^3 , resultierend aus den Abmessungen von $4 \times 2 \times 1 \text{ m}^3$ (Länge x Breite x Höhe). Im Falle dieses Systems beinhaltet der einen Meter breite Druckkopf 64 Druckmodule mit insgesamt 8.192 einzelnen Piezodüsen. Derartige Anlagen ermöglichen nicht nur die Herstellung einzelner, großformatiger Gussformen sondern bieten auch Potential zur additiven Kleinserienfertigung (voxeljet AG 2015).

Neben der Aufskalierung kann eine höhere Produktivität auch durch einen sogenannten *kontinuierlichen* 3-D-Druckprozess erreicht werden. Günther et al. (2014) beschreiben ein Formstoffdruckverfahren, bei dem die Bauebene um einen Winkel zwischen 20° und 45° gekippt ist. Dieser Winkel muss kleiner sein als der Winkel der inneren Reibung (Böschungswinkel) des verwendeten Partikelmaterials. Diese Anordnung ermöglicht einen horizontalen Abzug der Bauebene und eliminiert damit die Dimensionsbegrenzung eines Teils in eine Raumrichtung. Abbildung 2.9 zeigt schematisch das Funktionsprinzip des kontinuierlich arbeitenden 3-D-Druckers sowie eine Fotografie eines Anlagenprototyps (Günther et al. 2014).

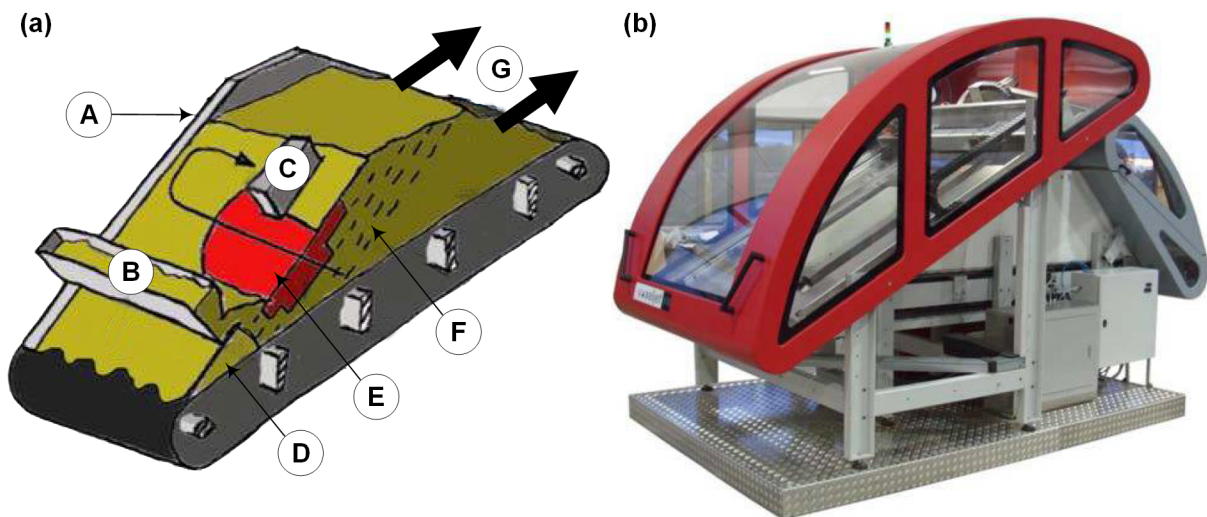


Abbildung 2.9: Funktionsprinzip im Längsschnitt des kontinuierlich arbeitenden 3-D-Druckers (a) und Fotografie des Anlagenprototyps (b) (Günther et al. 2014). A = Feste Wand, B = Beschichter, C = Druckkopf, D = Neigungswinkel, E = Bedruckter Bereich, F = Schichtebenen, G = Abzugsrichtung.

Sowohl der Beschichter als auch der Druckkopf arbeiten parallel zu der geneigten Bauebene. Der Abzug des Materialbetts erfolgt durch ein Förderband, welches sich zwischen den festen Wänden und unterhalb des Materialbetts befindet. Fertig gedruckte Teile können an der Rückseite der Anlage von umliegenden Partikelmaterial befreit und entnommen werden.

Die rasant gestiegene wirtschaftliche Bedeutung der additiven Fertigungstechnologien zeigt seit seiner Ersterscheinung im Jahr 1995 der Branchenindex *Wohlers Report* regelmäßig auf. Dabei wird zwischen *consumer* und *industrial* Anlagen unterschieden. Letztere zeichnen sich durch einen Verkaufspreis von über 5.000 US-Dollar aus. Wohlers und Caffrey (2015, S. 128) beziffern die Anzahl an industriell eingesetzten, additiven Fertigungsanlagen, die im Jahre 2014 weltweit verkauft wurden, auf 12.850 Einheiten. Dies entspricht einem Wachstum von über 30% gegenüber 2013. Auch in den Jahren zuvor konnten ähnlich starke Wachstumsraten erzielt werden. Der Anteil der Anlagen, die in der Gießereiindustrie eingesetzt werden, wird hier mit 9% angegeben. Obwohl demzufolge die Anzahl der 3-D-Drucker, die zur Herstellung von Gussformen eingesetzt werden, nur einen verhältnismäßig geringen Anteil an allen generativen Fertigungsanlagen ausmacht, ist die Verbreitung und Akzeptanz dieses Verfahrens in den letzten Jahren stark gestiegen. Dies lässt sich am Beispiel der Leichtmetallgießerei der BMW

Group in Landshut beobachten. 2001 wurde hier der erste 3-D-Drucker zur Herstellung von Sandformen und -kernen in Betrieb genommen. Fokus war damals die Weiterentwicklung von Zylinderköpfen mit Hilfe von Sandgussprototypen (Schürmann 2013). Durch den konsequenten Einsatz dieser Technologie konnte die BMW Group die Entwicklungszeiten und -kosten von komplexen Gussteilen deutlich reduzieren (Höchstmann 2013). Gartner (2011) sowie Woods und Ravi (2015) fassen die Vorteile für Gießereien beim Einsatz von 3-D-Druckern zur Sandformherstellung folgendermaßen zusammen:

- Designfreiheit: Darstellbarkeit hochkomplexer, hinterschnittener Formen und Kerne, die lediglich vom umliegenden, losen Sand befreit werden müssen
- Verkürzte Durchlaufzeiten: Von der Fertigstellung der Konstruktion bis zum ersten Abguss vergehen wenige Tage im Vergleich zu mehreren Wochen bei konventioneller Herstellung mit Modelleinrichtungen oder Dauerformen
- Reduktion der Nacharbeit: Durch die Reduktion der Einzelteile einer Gussform können Montagetoleranzen eliminiert und die Maßhaltigkeit verbessert werden
- Kosteneinsparung: Modelllagerung und -wartung entfallen

Dimitrov und Schreve (2006) beschreiben die Möglichkeit additiv hergestellte Sandformen und Kerne mit konventionellen Formen zu kombinieren. Somit können beispielsweise bei der Auslegung eines Anschnittsystems verschiedene Geometrievarianten durch austauschbare, additiv gefertigte Formteile dargestellt werden. Als Gussmaterial kommen dabei Aluminium-, Kupfer- und Eisenbasiswerkstoffe in Frage (Chhabra und Singh 2011). Abbildung 2.10 zeigt ein typisches Anwendungsbeispiel für eine additiv hergestellte Sandform mit entsprechenden Kernen (Kernpaket), sowie das Gussteil, welches damit in einem konventionellen Gießprozess hergestellt werden kann (Berger et al. 2013, S. 196).

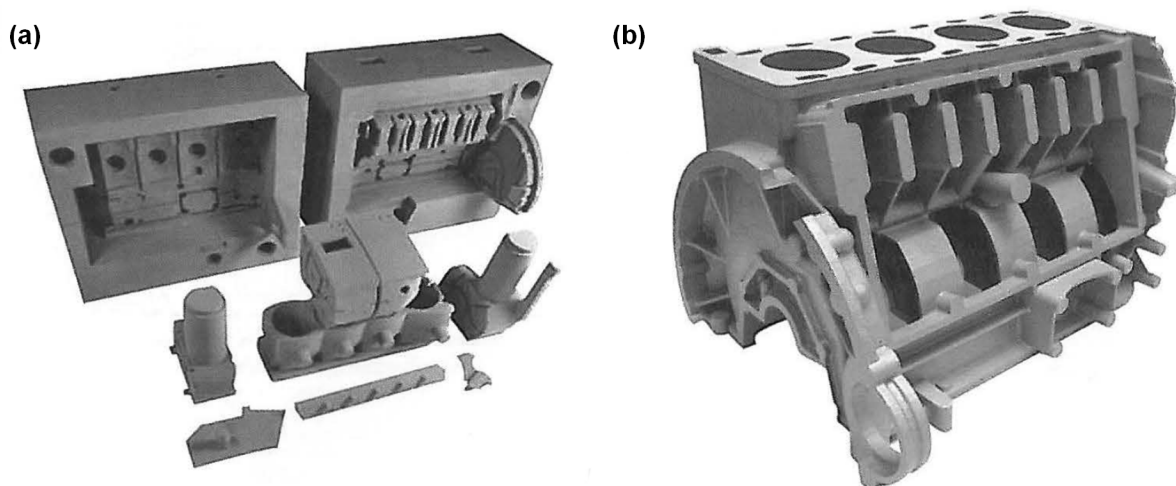


Abbildung 2.10: Gedrucktes Kernpaket eines Kurbelgehäuses (a) und damit hergestelltes Gussteil (b) (Berger et al. 2013, S. 196)

Das volle Potential der zuvor genannten Designfreiheit bei der additiven Herstellung von Formen und Kernen kann beispielsweise bei einer Kombination mit einer Topologieoptimierung

ausgeschöpft werden. Riker (2015) beschreibt die simulationsgestützte Auslegung und indirekte additive Herstellung eines Aluminiumradträgers. Nach einer Topologieoptimierung und einer Gießprozesssimulation wurden die konventionell nicht herstellbaren Formen und Kerne abgeleitet und 3-D-gedruckt. Das in einem Seriegießprozess realisierte Bauteil weist bei identischem Gewicht und vergleichbarer Lebensdauer eine drei- bis fünffach höhere Steifigkeit auf. In Anbetracht derartiger Möglichkeiten prognostiziert Ségaud (2014) für die Serienfertigung von Motorengusskomponenten die Substitution erster Kernschießmaschinen (Anlagen für das heutige Serienverfahren) durch 3-D-Drucker für das Jahr 2025.

2.3 Prüfung und Charakterisierung

Die Prüfung und Charakterisierung von verschiedenen technologischen Eigenschaften stellt sowohl im Bereich der Formstoffe als auch bei additiv hergestellten Objekten die Basis jeglicher Entwicklung dar. Nur verlässliche Prüf- und Charakterisierungsmethoden ermöglichen die quantitative Erfassung von Kennwerten und damit den objektiven Vergleich und die Weiterentwicklung von Produkten und Prozessen.

Der Einsatz von Formstoffen in einer Gießprozesskette bringt eine Reihe technologischer Anforderungen mit sich, die das Formstoffsystem erfüllen muss. Die Beanspruchung der Formen und Kerne führen Flemming und Tilch (1993, S. 24) auf mechanische, mechanisch-thermische, thermische und chemische Vorgänge zurück, die während des Gießprozesses stattfinden. Nur wenn die technologischen Eigenschaften des Formstoffs den Anforderungen des Gießprozesses entsprechen, können formstoffbedingte Gussfehler, wie sie Baier et al. (2010) beschreiben, vermieden werden. Der Stand der Technik in der Formstoffprüfung ist in einer Reihe von Merkblättern des Vereins Deutscher Gießereifachleute dokumentiert (VDG 2013).

Aufgrund der verhältnismäßig jungen Entwicklungsgeschichte der additiven Fertigungsverfahren ist auch die Verfügbarkeit von allgemeingültigen Prüfverfahren, die auf die Prozess- und Bauteileigenschaften dieser Teile abgestimmt sind, relativ gering. VDI (2014) benennt eine Reihe von Anforderungen, die an ein additiv hergestelltes Bauteil gestellt werden können. Dazu gehören beispielsweise Anforderungen an die geometrische Beschaffenheit sowie an die Festigkeit. Um die Anforderungen an ein generativ hergestelltes Teil erfüllen zu können, empfiehlt die genannte Richtlinie eine Prüfung des Ausgangsmaterials, eine Überwachung des Prozesses sowie eine Prüfung des Bauteils. Dabei gilt:

Die Gestalt der zu verwendenden Probe- und Prüfkörper, deren Position auf der Bauplatte sowie Art und Häufigkeit der Prüfung sind jeweils anwendungsspezifisch festzulegen.

Die folgenden Abschnitte stellen die Grundlagen der für die vorliegende Arbeit festgelegten Prüf- und Charakterisierungsverfahren vor. Diese basieren auf Anforderungen, die sowohl aus dem Bereich der Formstoffe als auch aus dem Gebiet der additiven Fertigung entstammen. Die experimentelle Umsetzung der Prüfungen wird in Abschnitt 4 dargelegt.

2.3.1 Physikalische Eigenschaften

Die Dichte ist sowohl aus Sicht der Formstoffprüfung als auch aus Sicht der additiven Fertigung ein bedeutendes Qualitätsmerkmal. Ein Formstoff muss eine gewisse Verdichtung auf-

weisen, um beispielsweise das Eindringen von Schmelze beim Gießen (Penetration) zu verhindern. Nach Baier et al. (2010, S. 65) ist eine ungenügende Verdichtung der Kerne eine der Hauptursachen für das Auftreten von Penetration an chemisch gebundenem Formsand. Bei der additiven Fertigung spielt die Dichte (in Form der Schüttgutedichte) bereits während des Herstellprozesses eine entscheidende Rolle. Sie gibt an, wie hoch der Materialausfüllungsgrad in einem definierten Volumen ist (Schulze 2014, S. 22). Wegner (2013) untersucht die Ursachen für mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen. Bei diesem, dem 3-D-Drucken verwandten additiven Fertigungsverfahren, stellt er fest, dass eine schwankende Schüttgutedichte des Eingangsmaterials sowohl den Prozess als auch die späteren Eigenschaften der hergestellten Bauteile maßgeblich beeinflusst. Er nutzt die Dichte der hergestellten Teile um Rückschlüsse auf die Abhängigkeit der hergestellten Teile in Bezug auf ihre Position in der Anlage zu ziehen.

Die Permeabilität eines Materials beschreibt seine Durchlässigkeit für ein flüssiges oder gasförmiges Medium. Bei der Betrachtung eines Formstoffs ist diese Eigenschaft von größter Bedeutung, um Gaseinschlüsse in Gussteilen zu vermeiden (Hasse 2008, S. 473). Die Entstehung von Gasen bei einem Gießprozess mit Formstoffen ist unvermeidbar und hängt vor allem von dem Feuchtegehalt und dem Anteil an flüchtigen Bestandteilen ab. Diese Gase können nur bei einer ausreichenden Permeabilität des Formstoffs abgeführt werden. Haupteinflussfaktoren der Permeabilität eines Formstoffsystems sind nach American Foundrymen's Society (1952, S. 65) die Beschaffenheit des Formgrundstoffs (Korngröße, -form, und -verteilung), die Art und Menge des Binders sowie die Verdichtung und der Feuchtegehalt des Formstoffsystems. Die Permeabilität K eines porösen Körpers hat die Einheit m^2 und ist folgendermaßen definiert (Hölting und Coldewey 2013, S. 25):

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot l}{A \cdot \Delta p} \quad (1)$$

Dabei ist Q der Volumenstrom in $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, l die durchströmte Länge in m, A die durchflossene Fläche in m^2 und Δp die Druckdifferenz in Pa. η ist die dynamische Viskosität von Luft und beträgt bei 25°C $18,42 \mu\text{Pa s}$ (Kramer 2002, S. 29).

Der Feuchtegehalt ist ein Qualitätsmerkmal, welches ebenfalls der Formstoffprüfung entstammt. Wie bereits erwähnt, ist Formstofffeuchtigkeit beim Gießen maßgeblich für die Gasentwicklung verantwortlich. Die Ermittlung des Feuchtegehalts erfolgt über die Bestimmung des Gewichtsverlusts einer Sandprobe beim Trocknen (Hasse 2008, S. 437).

2.3.2 Mechanische Eigenschaften

Definierte mechanische Eigenschaften sind sowohl aus Sicht der Formstofftechnologie als auch aus Sicht der additiven Fertigung eine zentrale Anforderung. Die Charakterisierung von mechanischen Eigenschaften umspannt ein ausgesprochen weites Feld an Kennwerten und Prüfverfahren zu deren Ermittlung. Im Folgenden wird daher nur auf die im Rahmen dieser Arbeit relevanten mechanischen Eigenschaften der Bruch- und Abriebfestigkeit eingegangen.

Im Bereich der Formstoffprüfung befassen sich die VDG-Merkblätter P38 (VDG 1997) und P71 (VDG 1999) mit der Festigkeit von ton- bzw. chemisch gebundenen Formstoffen. Hier werden Verfahren zur Ermittlung der Druck-, Spalt-, Scher und Biegefestigkeit an standardi-

sierten Prüfkörpern beschrieben. Für die Prüfung von additiv gefertigten Bauteilen bestehen keine expliziten Vorschriften zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte. Hier werden je nach Material und Anwendungsbereich die jeweils geltenden Vorschriften für konventionell gefertigte Bauteile / Probekörper angewendet (VDI 2013). Durch die quasi uneingeschränkte geometrische Gestaltungsfreiheit beim 3-D-Drucken können Prüflinge für eine Vielzahl verschiedener mechanischer Prüfungen hergestellt werden. Ein verfahrensspezifischer Nachteil der additiven Fertigungsverfahren ist die Abhängigkeit der Bauteileigenschaften von ihrer Lage bzw. Orientierung im Bauraum der Maschine, in der sie hergestellt werden (VDI 2015). Um diesen Aspekt bei der Untersuchung der Festigkeit berücksichtigen zu können, muss der gewählte Prüfkörper im Verhältnis zu dem verfügbaren Bauraum klein sein. Nur so können hinreichend viele Probekörper in einem Prozess hergestellt werden, um Aussagen über die Inhomogenität der Bauteileigenschaften in Bezug auf ihre Lage und Orientierung zu treffen.

Der 4-Kugelversuch nach Danzer, Lube et al. (2002), der ursprünglich für die Prüfung von Hochleistungskeramik entwickelt wurde, bietet sowohl aus Sicht der Formstoffprüfung als auch aus Sicht eines additiven Fertigungsprozesses vorteilhafte Prüfbedingungen. Hierbei handelt es sich um Prüfverfahren zur Ermittlung der biaxialen Biegefestigkeit an einem scheibenförmigen Prüfkörper, dessen Dicke und Durchmesser innerhalb eines vorgegebenen Verhältnisses frei variiert werden können (Danzer et al. 2006). Bei diesem Festigkeitsprüfverfahren wird der Prüfkörper zwischen drei Auflagerkugeln und einer Lastkugel eingespannt und bis zum Bruch belastet. Die drei Auflagerpunkte bilden dabei ein gleichseitiges Dreieck und die Lasteinleitung erfolgt über die gegenüberliegende Probenseite im Probenmittelpunkt (Danzer, Harrer et al. 2006). Abbildung 2.11 illustriert schematisch die Prüfsituation mit der daraus resultierenden Spannungsverteilung im Prüfkörper nach Boerger (2002).

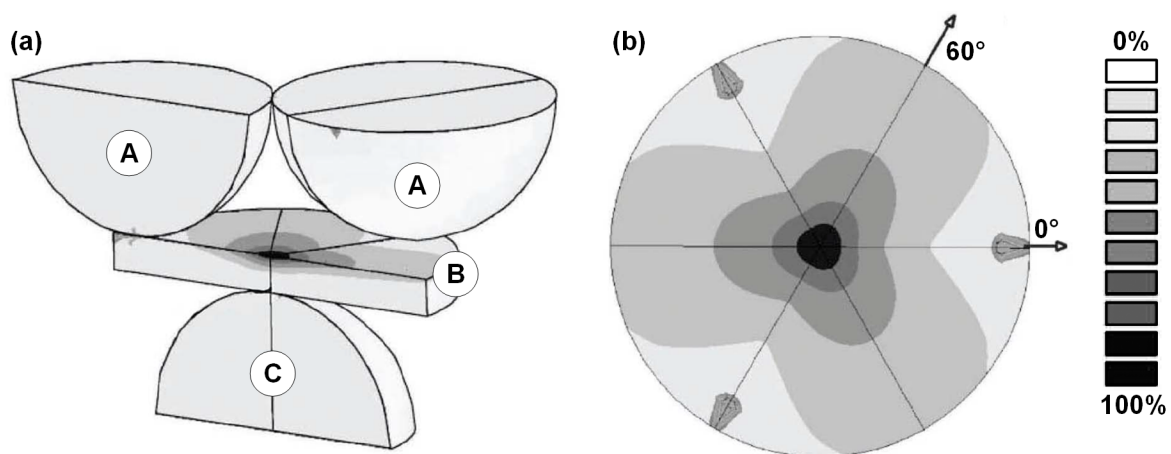


Abbildung 2.11: Schematische Schnittdarstellung (a) und Draufsicht der Auflagerseite (b) mit aufgetragener Spannungsverteilung (prozentualer Anteil der maximalen Zugspannung) bei der Belastung eines scheibenförmigen Prüfkörpers im 4-Kugelversuch (Boerger 2002). A = Auflagerkugeln, B = Prüfkörper, C = Lastkugel.

Bei der Belastung der Probe kommt es zu einem isotropen, biaxialen Spannungszustand. Das Spannungsmaximum tritt im Probenmittelpunkt der Auflagerseite auf. In dieser Lastsituation liegt ein besonderer Vorteil des Prüfverfahrens. Versagt die Probe am Spannungsmaximum

im Probenzentrum, so erfolgt hier die Rissinitiierung. Der Rissfortschritt erfolgt von innen nach außen. Somit können Kanteneffekte, die besonders bei spröde brechenden Materialien einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit haben, ausgeschlossen werden (Danzer et al. 2009). Mithilfe von Formel 2 kann aus der gemessenen Bruchkraft $F_{B,4KV}$, und der Probendicke t_{4KV} die Bruchspannung σ_{4KV} berechnet werden.

$$\sigma_{4KV} = f \cdot \frac{F_{B,4KV}}{t_{4KV}^2} \quad (2)$$

Der Proportionalitätsfaktor f_{4KV} hängt von der Querkontraktionszahl des zu prüfenden Materials und den geometrischen Verhältnissen (Probendicke, Probenradius, Auflagerradius) ab. In Anlehnung an VDG (1997) wurde ein Probenradius von 25 mm gewählt. Diese Geometrie ermöglicht die zerstörungsfreie Bestimmung der Permeabilität vor der zerstörenden Prüfung der Festigkeit des identischen Prüfkörpers. Aus den geometrischen Randbedingungen des 4-Kugelversuchs ergibt sich eine Probendicke von 10 mm. Für die Querkontraktionszahl von Quarzsand wurde ein Literaturwert von 0,3 angenommen (Gercek 2007). Die grundsätzliche Eignung dieses Festigkeitsprüfverfahrens für die mechanische Charakterisierung additiv hergestellter Formstoffproben konnten Ramakrishnan et al. (2014) zeigen. Für die Bestimmung der Festigkeit in der vorliegenden Arbeit wurden Modifikationen an dem Prüfverfahren vorgenommen, die in Abschnitt 4.4.4 detailliert beschrieben werden.

Neben einer ausreichenden Bruchfestigkeit muss ein Formstoff eine hinreichende Beständigkeit gegen den Abrieb von Sandpartikeln aufweisen (Flemming und Tilch 1993, S. 22). Anforderungen an die Abriebfestigkeit bestehen sowohl bei der Handhabung und Montage einer Form oder eines Kerns als auch beim Abguss. Lose Sandpartikel, die vor dem Abguss in die Form gelangen oder von der Schmelze aus der Form oder einem Kern mitgerissen werden, können zu Gussfehlern in Form von Sandeinschlüssen führen (Hasse 2003, S. 77). Die Prüfung der Abriebbeständigkeit ist nicht standardisiert oder normiert. Die einzige Dokumentation zur Bestimmung der Abriebfestigkeit eines Formstoffs findet sich in der Beschreibung eines entsprechenden Prüfgeräts der Georg Fischer AG, Schaffhausen (Schweiz), welches nicht mehr kommerziell erhältlich ist. Bei diesem Gerät werden zwei scheibenförmige Prüfkörper mit einer definierten Kraft stirnseitig aneinandergedrückt und gegenläufig rotiert. Der nach einer gewissen Zeit entstandene Abrieb wird gewogen und als Ergebnisgröße verwendet (Fischer 1990). Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Prüfverfahren basiert auf einem ähnlichen Prinzip. Die Beschreibung der experimentellen Umsetzung erfolgt in Abschnitt 4.4.4.

2.3.3 Geometrische Eigenschaften

Neben anforderungsgerechten physikalischen und mechanischen Eigenschaften müssen additiv hergestellte Objekte ebenso wie Formstoffe gewissen Anforderungen an ihre geometrische Beschaffenheit genügen. Die Ursachen und Ausprägungen von geometrischen Abweichungen eines Bauteils sind sehr vielfältig. Als Ursache für formstoffbedingte Maßabweichungen geben Flemming und Tilch (1993, S. 32) beispielsweise fehlerbehaftete Modell- und Formeinrichtungen sowie geometrische Ungenauigkeiten bei der Kernmontage und dem Zulegen der Formteile an. Bei der generativen Herstellung eines Teils kann es ebenfalls durch eine Reihe verschiedener Ursachen zu Maßabweichungen kommen. Als Beispiele können hier der charakteristische *Treppenstufeneffekt* und thermisch bedingte Vorzüge genannt werden (VDI 2015).

Eine bei thermisch aktivierten, generativen Fertigungsprozessen häufig auftretende Form des Verzugs ist der sogenannte *Curl*. *Curl* oder *Curling* kann nach Berger et al. (2013, S. 18) durch ungleichmäßiges Abkühlen oder ungleichmäßiges Abtrocknen oder Abbinden eines Bauteils entstehen. Diese geometrische Abweichung äußert sich durch das Aufrollen von Randbereichen additiv gefertigter Teile (Gebhardt 2013, S. 62). Diese Form der geometrischen Abweichung tritt häufig beim selektiven Lasersintern von Kunststoffen auf. Sie ist besonders kritisch, da sie nicht nur zu erheblichen Maßabweichungen am fertigen Teil führt, sondern auch einen Prozessabbruch bei der Herstellung verursachen kann. Heben sich verfestigte Randbereiche eines Teils vom Pulverbett über ein kritisches Maß hinaus ab, so werden sie von dem Beschichter mitgerissen und zerstören ggf. umliegende Teile (Wegner 2013). Da der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte 3-D-Druckprozess ebenfalls thermisch aktiviert ist, wird das Auftreten von *Curl* in Abhängigkeit verschiedener Faktoren untersucht.

Als weitere Form der geometrischen Abweichung kann es bei dem 3-D-Druckprozess zu Materialanhaftungen bedingt durch *Fluidmigration* kommen. Darunter ist das *Wandern* von eingetragenen Druckfluid in umliegende, nicht bedruckte Bereiche zu verstehen (Utela et al. 2008). Nach Stieß (2009, S. 138) kann Flüssigkeit im Hohlraum zwischen Feststoffpartikeln auf vier verschiedene Arten gebunden werden. Diese sind Haftflüssigkeit, Zwickel- und Brückenflüssigkeit, Kapillarflüssigkeit (Übergangsbereich) und Kapillarflüssigkeit (Sättigungsbereich). Abbildung 2.12 veranschaulicht die verschiedenen Stadien der Fluidbindung.

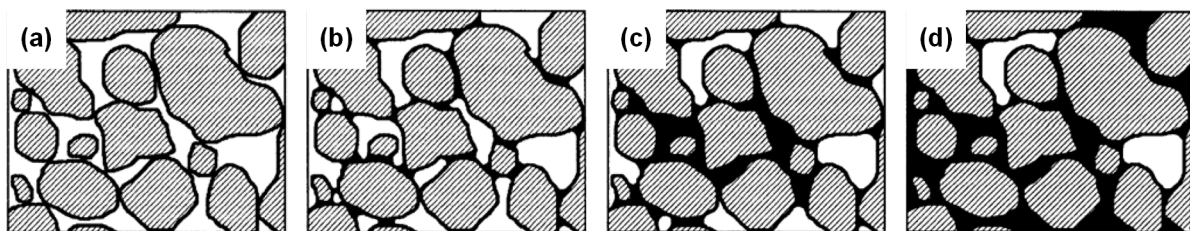


Abbildung 2.12: Bindung von Flüssigkeit (schwarz) im Hohlraum (weiß) zwischen Feststoffpartikeln (schraffiert) nach Stieß (2009, S. 139). Die Flüssigkeit liegt als Haftflüssigkeit (a), Zwickel- und Brückenflüssigkeit (b), Kapillarflüssigkeit im Übergangsbereich (c) oder Kapillarflüssigkeit im Sättigungsbereich (d) vor.

Aufgrund der Feuchtigkeit aus der Umgebung sind alle Partikel von einer wenige Moleküllagen dicken Schicht adsorbierter Haftflüssigkeit (a) umgeben. Fluidmigration tritt auf, wenn das eingetragene Druckfluid durch Kapillar- und Schwerkraft in Bereiche vordringt, die nicht vom Druckkopf bedruckt wurden. Ist in diesen Bereich genügend Flüssigkeit vorhanden, um Zwickel und Brücken (b) auszubilden, so entstehen bei der Trocknung feste Binderbrücken und das Material haftet in Form von Fluidmigration an. Da zur Bewertung dieses Phänomens keine standardisierte Methode besteht, wurde im Rahmen der Arbeit ein Prüfkörper entwickelt, der sensibel auf Fluidmigration reagiert und quantitative Aussagen zulässt.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Bei seiner allgemeinen Betrachtung der Anforderungen an additive Verfahren für die Fertigung stellt Gebhardt (2013, S. 438) fest, dass die derzeit verfügbaren, generativen Prozesse durch eine aufwendige, bauteilabhängige Parameteroptimierung gekennzeichnet sind und nicht befriedigende Reproduzierbarkeit der Bauergebnisse zeigen.

Die vorliegende Arbeit nimmt sich diesen Herausforderungen für den Prozess des pulverbettbasierten 3-D-Druckens mit einem anorganischen Formstoffsystem an. Das wissenschaftliche Ziel der Arbeit ist die Erstellung eines empirischen Modells des betrachteten Prozesses, welches die quantitativen Zusammenhänge zwischen ausgewählten Eingangs- und Ausgangsgrößen aufzeigt.

Dazu muss zunächst eine Beschreibung des Systems in einem angemessenen Detaillierungsgrad erfolgen. Hierbei werden zum einen die Eingangsgrößen des Gesamtprozesses in konstant zu haltende Parameter und gezielt variierbare Faktoren aufgeschlüsselt. Zum anderen kommt der Quantifizierung der Ausgangsgrößen mittels entsprechender Mess- und Prüfverfahren besondere Bedeutung zu.

Aufbauend auf den im vorhergehenden Abschnitt dargelegten Grundlagen der additiven Fertigung und der anorganischen Bindersysteme erfolgt die Beschreibung des experimentellen Vorgehens. Hierbei werden sowohl die verwendeten Materialien und die Prozessspezifika der Versuchsanlage eingeführt als auch die Prozessmodule und der Versuchsplan detailliert beschrieben. Die hohe Systemkomplexität verbunden mit einer geringen Prozessstabilität lassen der Untersuchung der Reproduzierbarkeit dabei besondere Bedeutung zukommen. Die zuvor eingeführten Prüfmethode und -verfahren werden, insbesondere im Bereich der Formstoffprüfung, weiterentwickelt und den Anforderungen des betrachteten Prozesses angepasst. Die Darstellung der Ergebnisse richtet sich nach den variierten Faktoren. So können die Auswirkungen der Faktorenvariationen auf die Ergebnisgrößen strukturiert und objektiv dargelegt werden. Die anschließende Interpretation der Ergebnisse erfolgt auf Basis einer Fehlerbetrachtung und einer Signifikanzanalyse. Dieses Vorgehen ermöglicht die Berücksichtigung einer Vielzahl von Eingangsgrößen bei der Modellbildung sowie das Treffen von fundierten Aussagen über ihre Auswirkungen auf eine Reihe relevanter Ausgangsgrößen.

Im Rahmen der Schlussbetrachtung werden die gewonnen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche, weitergehende Forschungsaktivitäten in diesem Bereich der additiven Fertigung gegeben.

4 Experimentelles

Der folgende Abschnitt legt die experimentelle Vorgehensweise im Rahmen der vorliegenden Arbeit dar. Die anfängliche Systembeschreibung gibt einen Überblick über alle Elemente des Systems und die Relationen in denen sie zueinander stehen. Sie ist somit die Basis des entwickelten, empirischen Modells. Sämtliche Informationen bzgl. Materialspezifikationen, der verwendeten 3-D-Druckanlage sowie Arbeits- und Prüfroutinen werden bereitgestellt. Dies beinhaltet eine detaillierte Beschreibung aller Prozessmodule, Ein- und Ausgangsgrößen sowie ihrer Bedeutung für das Gesamtsystem. Ebenso erfolgen in diesem Kapitel die Beschreibung von ergänzenden Versuchsreihen, die außerhalb der empirischen Modellbildung durchgeführt wurden. Das Kapitel schließt mit der Erörterung des Versuchsplans.

4.1 Systembeschreibung

Die allgemeine Systemtheorie stellt die notwendigen Methoden zur Erfassung, Darstellung und Modellierung von komplexen Systemen zur Verfügung. Lindemann (2009, S. 8) definiert dabei das System als eine Betrachtungseinheit, die von einem Bearbeiter zu einem spezifischen Zweck definiert wurde. Dieser Zweck ist im vorliegenden Fall das Verständnis von Ursache-Wirkung-Zusammenhängen in einem Produktionsprozess.

Nach Ropohl (2009, S. 75) stellt das vorliegende System eine Kombination aus einem *funktionalen* und einem *strukturellen* System dar. Der strukturelle Teil des Systems beschreibt die einzelnen Elemente innerhalb der Systemgrenze – im vorliegenden Fall die Prozessmodule – und die Relationen in der sie zueinander stehen. Die Relationen entsprechen Informationen bzw. Zuständen, die von einem Prozessmodul zum nächsten Übertragen werden. Die einzelnen Prozessmodule *Pre-*, *In-* und *Post-Prozess* sind von der Systemgrenze umgeben.

Das funktionale Systemkonzept sieht alles innerhalb der Systemgrenze als *Black Box* und betrachtet nur die Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems. Die Eingangsgrößen des vorliegenden Systems beinhalten die zu variierenden Faktoren und die konstant zu haltenden Parameter. Die Ausgangsgrößen setzen sich aus Haupt- und Nebenergebnissen zusammen.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte empirische Modell beschreibt die mathematischen Relationen zwischen den Faktoren und den Hauptergebnissen. Die Betrachtung der Parameter sowie die Auswertung der Nebenergebnisse dienen weiterführenden Erklärungen und der Fehlerdiskussion. Abbildung 4.1 illustriert das System als Ganzes.

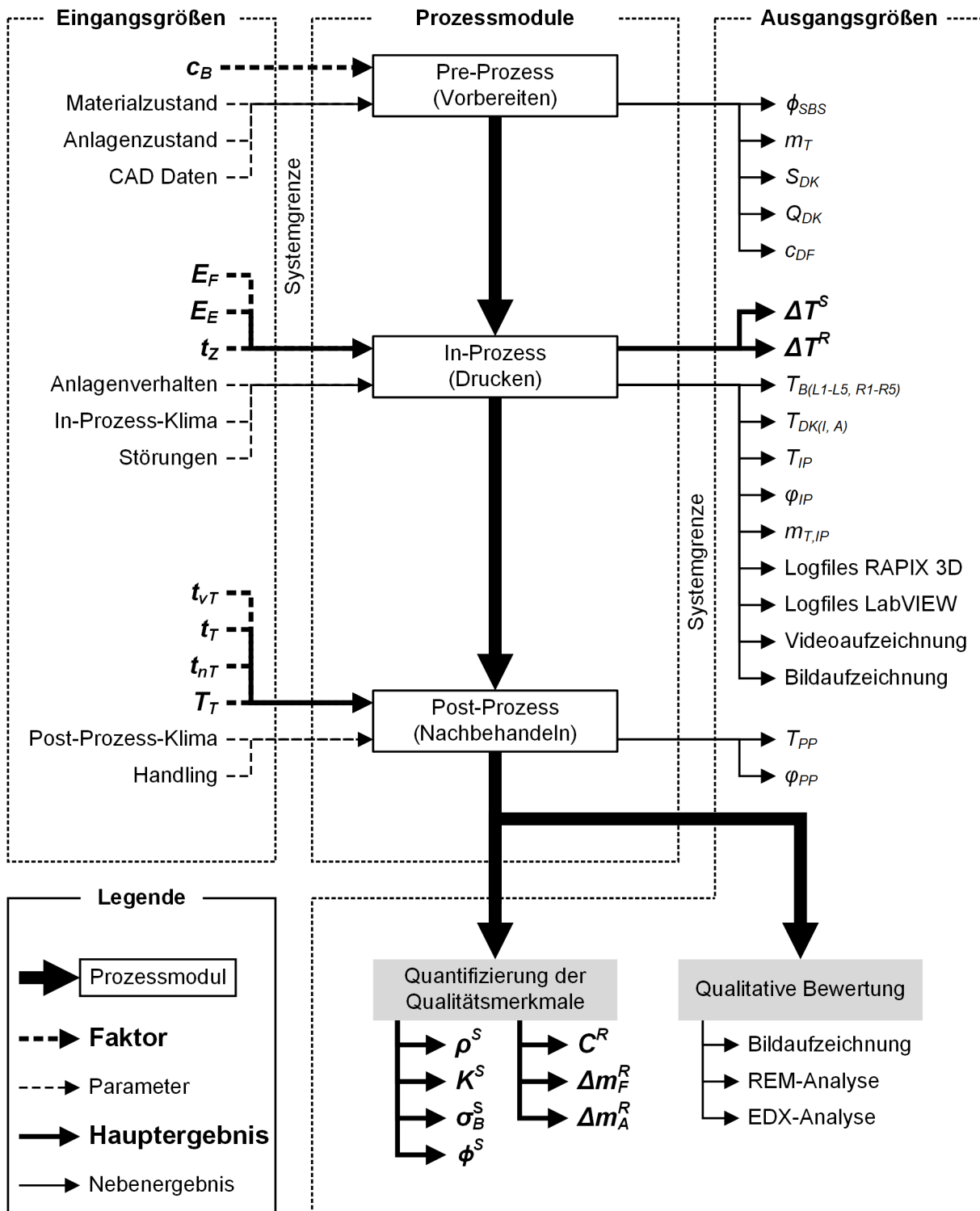


Abbildung 4.1: Das betrachtete System gliedert sich in die Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie die Prozessmodule. Das empirische Modell des Systems zeigt die mathematischen Zusammenhänge zwischen den Faktoren und den Hauptergebnissen auf.

Sämtliche Elemente, die in der Systembeschreibung aufgeführt werden, finden sich in der Beschreibung der Prozessmodule in Abschnitt 4.4 wieder. Um die Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie die Prozessmodule des Systems beschreiben zu können, ist ein grundlegendes

Verständnis der verwendeten Materialien und des 3-D-Drucksystems notwendig. Dieses wird durch die nachfolgenden Abschnitte 4.2 und 4.3 bereitgestellt.

4.2 Materialspezifikation

Dieser Abschnitt führt die im Rahmen der Versuche verwendeten Materialien ein. Formgrundstoff, Binder, Additive sowie deren Mischung und Bereitstellung, die gemeinsam das Sand-Binder-System (SBS) ausmachen, werden spezifiziert. Ebenso wird das Druckfluid beschrieben, welches der Aktivierung des SBS im Druckprozess dient.

4.2.1 Formgrundstoff

Bei dem verwendeten Formgrundstoff handelt es sich um einen natürlichen Quarzsand vom Typ HSQ 85 der Hüttenes-Albertus Chemische Werke GmbH, Düsseldorf, der sich durch höchste Reinheit und eine stark abgerundete Konform auszeichnet. Typische Kennwerte sind in Tabelle 4.1 aufgeführt (Hüttenes-Albertus 2012a):

Tabelle 4.1: Spezifikationen Spezialsand HSQ 85

Kennwert	Einheit	Wert
Dichte	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	2,60
Nennschüttdichte	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	1,40
Sinterbeginn	$^{\circ}\text{C}$	1575
Ausdehnungskoeffizient (200 - 600 $^{\circ}\text{C}$)	$10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$	23
Mittlere Korngröße	mm	$0,17 \pm 0,02$
AFS-Kornfeinheitsnummer	-	82 ± 7

Abbildung 4.2 zeigt zwei rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des Formgrundstoffs.

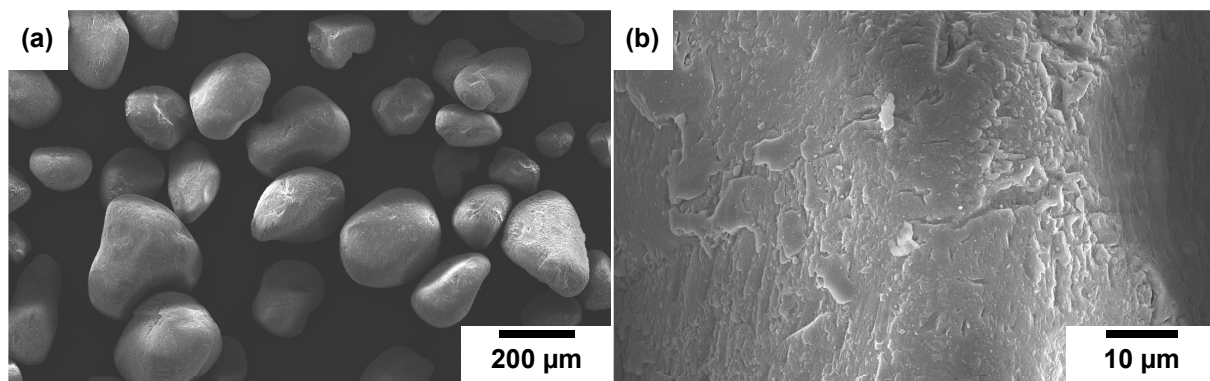


Abbildung 4.2: REM-Aufnahme des Formgrundstoffs in der Übersicht (a) und Detailaufnahme der Sandkornoberfläche (b)

Die REM-Aufnahmen verdeutlichen die Rundheit der Sandkörner. In der Detailaufnahme einer Sandkornoberfläche ist die zerklüftete Mikrostrukturierung zu erkennen. Diese Mikrostruktur ist für die Haftung von dem Binder an dem Sandkorn von entscheidender Bedeutung (Iden et al. 2011). Beim Benetzen des Sandkorns mit einem flüssigen Binder ummantelt dieser das

Sandkorn und verklammert sich mechanisch in der Mikrostruktur. Die ausgeprägte Rundheit des Sandes gewährleistet eine hohe Rieselfähigkeit, welche eine Grundvoraussetzung für die Verarbeitbarkeit mit einer Beschichterklänge im 3-D-Druckprozess ist (vgl. Abschnitt 2.2.2).

4.2.2 Binder und Additiv

Bei dem verwendeten anorganischen Binder handelt es sich um ein sprühgetrocknetes, pulverförmiges Natriumwasserglas. Ursprünglich wurden derartige Wasserglaspulver-Systeme für eine Verfestigung mit erwärmten Wasserdampf entwickelt (Polzin 2012, S. 69). Nähere Spezifikationen des verwendeten Binders können dem entsprechenden Produktinformationsblatt entnommen werden (Hüttenes-Albertus 2012b). Abbildung 4.3 zeigt den Binder im trockenen Ausgangszustand.

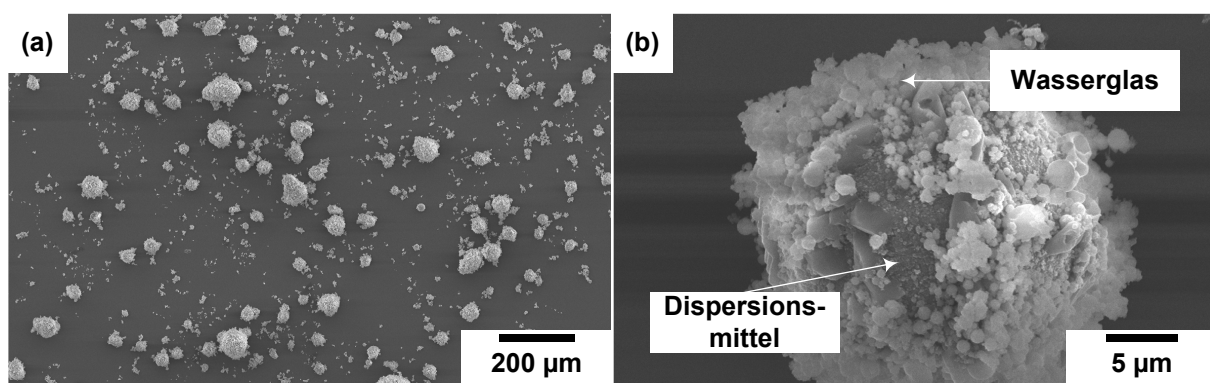


Abbildung 4.3: REM-Aufnahme des Binders in der Übersicht (a) und Detailaufnahme eines Binderpartikels (b)

Makroskopisch betrachtet ist der Binder ein feines, weißes Pulver. Bei ausreichend hoher Vergrößerung lässt sich die zweiphasige Beschaffenheit des Binders erkennen. Das Natriumwasserglas – der eigentliche Binder – liegt sehr fein verteilt auf der Oberfläche eines Dispersionsmittels vor. Es verhindert das Verklumpen des Wasserglases und sichert damit eine homogene Verteilung während des Mischprozesses von Formgrundstoff und Binder. Als Additiv zur Verbesserung der Gieß Eigenschaften dient Graphitpulver.

4.2.3 Mischprozess

Das Mischen von Formgrundstoff, Binder und Additiv erfolgte im Rahmen der Arbeit bei der voxeljet AG. Der Mischprozess findet in einem Flügelmischer vom Typ BWE – 250J der Belle Group statt. Das SBS wird in Chargen zu je 250 kg für 30 Minuten gemischt. Als Mischhilfe kommen Stahlkugeln unterschiedlicher Größen zum Einsatz. Nach dem Mischen trennt ein Rüttelsieb das SBS von der Mischhilfe. Anschließend werden je zwei Chargen in einen doppelwandigen Kunststoffbeutel abgefüllt und luftdicht verschlossen. Dieses Vorgehen stellt nach dem Prozesswissen der voxeljet AG eine homogene Vermischung von Formgrundstoff, Binder und Additiv sicher und konserviert das SBS bis zur Verwendung im 3-D-Drucker.

4.2.4 Druckfluid

Das Druckfluid ist die Flüssigkeit, die über die Düsen des Druckkopfs selektiv in das SBS eingetragen wird. Seine Funktion besteht darin, den Binder durch das Auflösen des Wasserglases zu aktivieren und so den Bindungsprozess in Gang zu setzen. Die wichtigste Eigenschaft des Druckfluids ist eine zuverlässige Tropfenerzeugung (Utela et al. 2008). Seine designierte Funktion im Sand-Binder-System kann das Fluid nur erfüllen, wenn der verwendete Druckkopf in der Lage ist prozesssicher Tropfen zu erzeugen. Sämtliche Spezifikationen zum verwendeten Druckkopf sind im Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Druckfluid besteht aus destilliertem Wasser, welches mit einem anorganischen Feststoff versetzt ist. Dieser Feststoff liegt fein dispergiert im Fluid vor und dient der gezielten Einstellung der gewünschten Viskosität und Oberflächenspannung. Die Einstellung dieser physikalischen Eigenschaften des Fluids ermöglichen erst eine prozesssichere Tropfenerzeugung mithilfe einer Piezodüse (Derby und Reis 2003). Das hier verwendete Druckfluid ist eine Eigenentwicklung der voxeljet AG und Teil des Materialsystems VX-AOB.

4.3 3-D-Drucksystem VX500

Das 3-D-Drucksystem der voxeljet AG vom Typ VX500 ist ein universell einsetzbarer 3-D-Drucker, der für die Verarbeitung einer Vielzahl von Materialsystemen geeignet ist (voxeljet AG 2013). Die folgenden Abschnitte stellen den Aufbau und die Funktionsweise des 3-D-Druckers und seiner Hauptkomponenten vor. Modifikationen und Erweiterungen an der Versuchsanlage werden ebenfalls beschrieben. Abbildung 4.4 zeigt eine schematische Zeichnung und die 3-D-Druckanlage vom Typ VX500 in der Standardausführung der voxeljet AG (voxeljet AG 2009a).

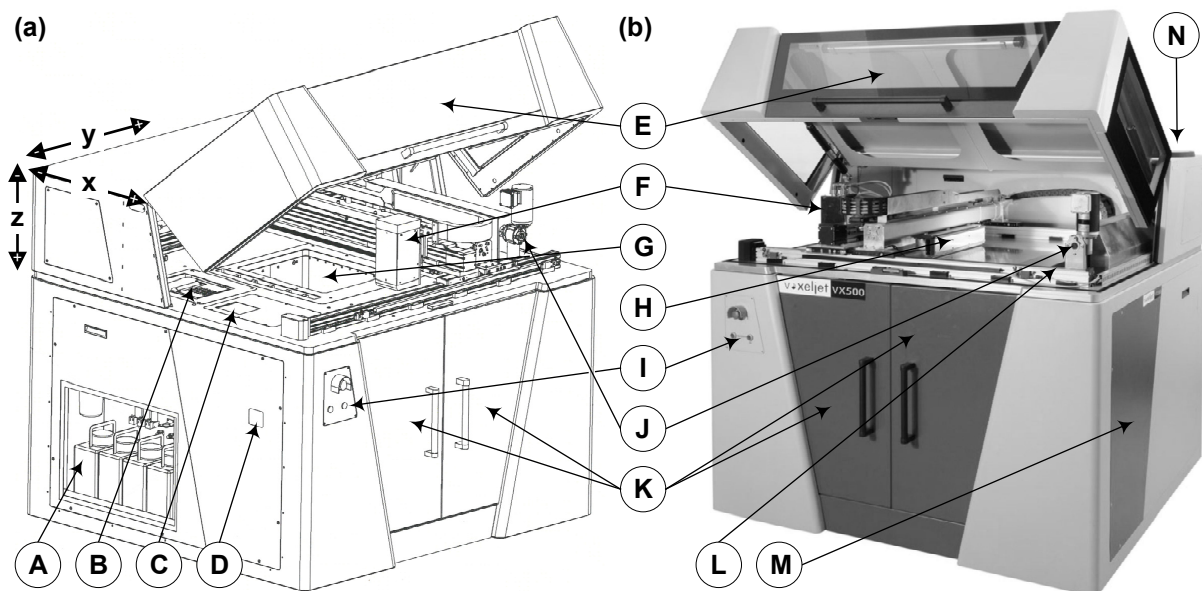


Abbildung 4.4: Schematische Zeichnung des VX500 3-D-Druckers (a) und Fotografie der Anlage (b) mit ihren Komponenten: A = Fluidversorgung, B = Reinigungsstation, C = Capping, D = Pneumatikschrank mit Unterdruckanzeige, E = Frontklappe, F = Druckkopf, G = Job-box, H = Beschichter, I = Schalter Steuerspannung, J = Schnecke, K = Fronttüren, L = Materialfang, M = Materialtank, N = Einfülltrichter

Das Basiselement der Anlage ist eine massive Aluminiumplatte, an der sämtliche Komponenten angebracht und ausgerichtet sind. Der elektrische Schaltschrank befindet sich auf der Anlagenseite, der Pneumatikschrank mit der Anzeige für die Unterdruckversorgung des Druckkopfs an der linken Anlagenseite. Um den experimentellen Anforderungen gerecht zu werden, wurden folgende Anpassungen an der Versuchsanlage des Lehrstuhls utg vorgenommen:

- Integration eines steuerbaren Infrarotstrahlers an der x-Achse (vgl. Abschnitt 4.3.4)
- Austausch der Frontklappe der Anlage durch einen Stahlrahmen mit klappbaren bzw. abnehmbaren Plexiglasscheiben. Aufbauend auf diesen Stahlrahmen befindet sich zentral über dem Baufeld ein klappbarer Aufbau, welcher der Positionierung der Wärmebildkamera (WBK) dient (vgl. Abschnitt 4.3.5)
- Integration von Thermoelementen zur Messung der Baufeldtemperatur und der Druckkopf-temperatur (vgl. Abschnitt 4.3.5)

Die vorgenommenen Anpassungen an der Versuchsanlage sind in der schematischen Draufsicht der Grundplatte und der photographischen Aufnahme in Abbildung 4.5 zu sehen.

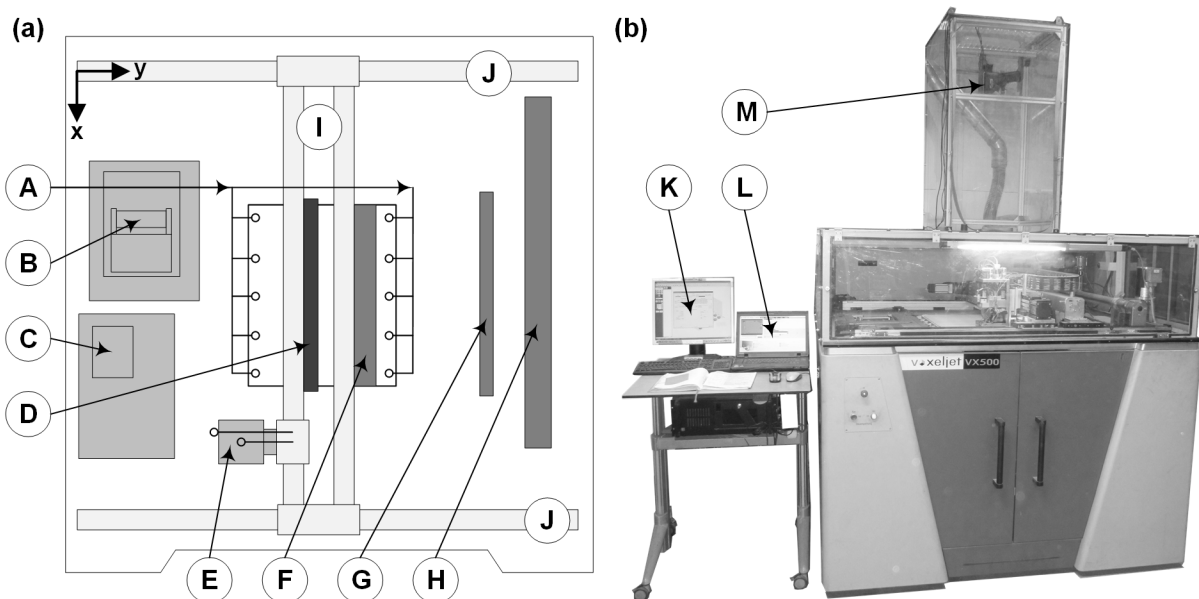


Abbildung 4.5: Schematische Draufsicht (a) und Fotografie (b) der modifizierten VX500 Versuchsanlage am Lehrstuhl utg: A = Thermoelemente, B = Reinigungsstation, C = Capping, D = IR-Strahler, E = Druckkopf (mit Thermoelementen), F = Beschichter, G = Materialfang, H = Schnecke, I = x-Achse, J = y-Achse, K = Anlagenrechner, L = Messrechner, M = Wärmebildkamera

Die unterschiedlichen Grautöne der Komponenten in der schematischen Draufsicht entsprechen den vier Hauptsystemen innerhalb der Anlage. Diese Komponenten gehören dem Positionierungssystem (I, J), Fluidsystem (B, C, D, E), Materialsystem (F, G, H) oder Heizungssystem (D) an. Ebenso wie die Steuerung und die Prozessüberwachung der Versuchsanlage werden diese in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben.

4.3.1 Positionierungssystem

Die Positionierung der beweglichen Komponenten erfolgt entlang der drei Achsen x, y und z. Die zweiteilige x-Achse ist auf zwei Schlitten auf den beiden y-Achsen montiert und gemeinsam sind sie für die Positionierung des Druckkopfs verantwortlich. Die einzelnen Druckmodule innerhalb des Druckkopfs sind mit der Grundplatte des Druckkopfs verstiftet und verschraubt. Über die ebenfalls verstiftete und verschraubte Verbindung zum Druckkopfschlitten ist die korrekte Positionierung bezüglich des Anlagenkoordinatensystems sichergestellt. Der Beschichter ist ortsfest an der x-Achse befestigt und folglich nur in der y-Richtung beweglich. Um die Materialschichten während des Druckprozesses übereinanderlegen zu können, ist eine vertikale (z-Richtung) Positionierung des Jobboxbodens (Bauplattform) notwendig. Diese Aufgabe übernimmt die z-Achse, welche die Bauplattform vertikal positioniert. Sämtliche Achsen gewährleisten eine Positionierungsgenauigkeit von $\pm 0,005$ mm (voxeljet AG 2009b).

4.3.2 Fluidsystem

Das Fluidsystem versorgt die Anlage mit Druck- und Reinigungsfluid (*Cleaner*) und sammelt Abfallfluid (*Waste*), welches während des Prozesses anfällt. Da das wasserbasierte Druckfluid durch den zugesetzten, anorganischen Feststoffanteil eine signifikant erhöhte Leitfähigkeit aufweist, ist von der Kombination unterschiedlicher metallischer Werkstoffe, die in direktem Fluidkontakt stehen, aus Korrosionsgründen abzusehen.

Druckkopf und Druckmodule

Zentraler Bestandteil des Fluidsystems ist der Druckkopf, der das Druckfluid in das SBS einträgt. Abbildung 4.6 zeigt eine Aufnahme des geöffneten Druckkopfs und ein Funktionsschema.

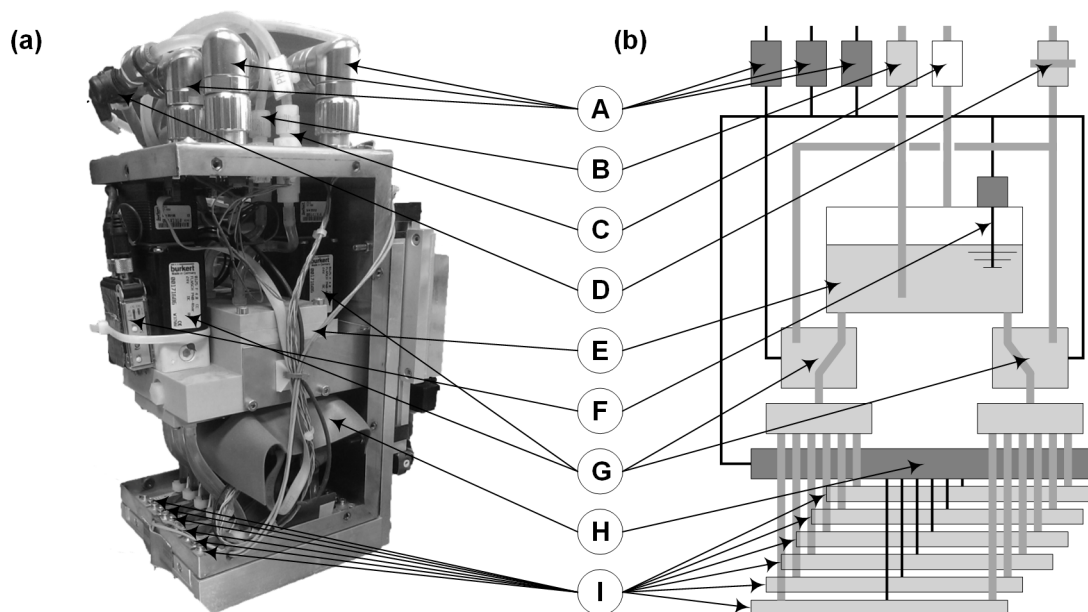


Abbildung 4.6: Geöffneter Druckkopf (a) und Funktionsschema (b): A = Elektrische Anschlüsse, B = Druckfluidversorgung, C = Unterdruckversorgung, D = Flow-Purge-Ventil, E = Fluid-tank, F = Füllstandsensoren, G = Verteilerventile, H = Steuerplatine, I = Druckmodule

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 Füllstandsensordetektiert 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. Tabelle 4.2 führt die relevanten Spezifikationen dieses Druckmodultyps auf (FUJIFILM Dimatix 2010). Abbildung 4.7 zeigt eine schematische Zeichnung eines Druckmoduls.

Tabelle 4.2: Spezifikationen Spectra SL-128 AA

Spezifikation	Einheit	Wert
Düsenanzahl	-	128
Düsenabstand	μm	508
Düsendurchmesser	μm	50
Soll-Tropfenmasse	ng	80
Tropfengeschwindigkeit	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	6 - 9
Max. Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	90
Max. Spannung	V	200
Max. Frequenz	kHz	30
Viskosität Druckfluid	mPas	2 - 20

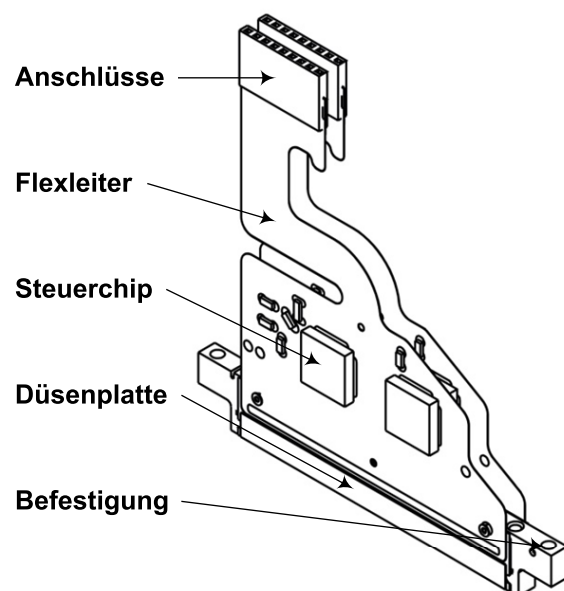


Abbildung 4.7: Schematische Zeichnung des Spectra SL-128 AA Druckmoduls

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 (vgl. Abschnitt 4.4.1) feinjustiert, bewegen sich jedoch meist im Bereich von 16,0 - 19,0 cmH₂O (Einheit des Unterdrucksensors an der Anlage) bzw. 65 - 85 V.

Reinigung und Capping

Um einen einwandfreien Betrieb des Druckkopfs zu gewährleisten, muss dieser vor sowie während des Druckprozesses in der Reinigungsstation gereinigt und gekühlt werden. Ist der Druckkopf nicht in Betrieb, so verbleibt er auf der Capping-Station, die einen feuchten Schwamm beinhaltet und den Druckkopf vor dem Eintrocknen schützt. Die Position der Reinigungs- und Capping-Station sind schematisch in Abbildung 4.5 dargestellt. Die Reinigungsstation besteht aus einer rotierenden Schaumstoffwalze, die über einem Becken montiert ist. Vor der Reinigung wird die Walze über ein Düsenrohr mit destilliertem Wasser aus dem Fluidsystem befeuchtet. Eine Anpresswalze drückt Binderreste aus der Reinigungswalze, um ein Zusetzen des Schaumstoffs mit Binder zu verhindern. Die standardmäßige Druckkopfreinigung erfolgt folgendermaßen:

- 0,5 s Purge
- 2-malige Walzenüberfahrt
- 10.000 Schuss Freispritzen

Bei dem sogenannten Purge-Vorgang wird die Unterdruckversorgung kurzzeitig umgekehrt und der Fluidtank mit einem Überdruck beaufschlagt. Dies führt zu einem Fluidstrom durch sämtliche Druckdüsen, der ggf. verschlossene Düsen freispült. Bei der Walzenüberfahrt werden überschüssige Fluidtropfen, die sich beim Purge-Vorgang unten am Druckkopf bilden, abgezogen. Hierbei müssen die Höhe und der Anpressdruck der Reinigungswalze optimal eingestellt sein, um ein flächiges Abziehen zu gewährleisten und gleichzeitig ein Eindringen von Wasser in die Düsen zu unterbinden. Der Freispritz-Vorgang aktiviert alle Düsen für eine Sekunde und stellt einen stabilen Düsenzustand sicher. Während des Druckprozesses wird die standardmäßige Druckkopfreinigung vor jedem Schichtzyklus durchgeführt.

4.3.3 Materialsystem

Das Materialsystem der Anlage ist für die Bereitstellung des SBS während des Druckprozesses verantwortlich. Es setzt sich aus der Materialförderung, dem Beschichter und der Materialentsorgung zusammen.

Materialförderung

Über den Trichter (vgl. Abbildung 4.4(N)) wird das SBS im Rahmen des Pre-Prozess in die Anlage eingefüllt. Die Förderschnecke befördert das Material in das Nachfüllrohr. Nach einer festgelegten Anzahl von aufgetragenen Schichten positioniert die y-Achse den Beschichter unterhalb des Nachfüllrohrs und durch das pneumatische Öffnen der Dosierklappe wird der Beschichter gefüllt.

Beschichter

Der Beschichter kann über einen steuerbaren Exzentermotor zum Schwingen angeregt werden und übernimmt den schichtweisen Auftrag des SBS während des Druckprozesses. Am unteren

Ende des Beschichters befindet sich die Klinge, die den Öffnungsspalt bestimmt. Sowohl der Spalt als auch die Drehzahl des Exzenters müssen auf das zu verarbeitende Material exakt eingestellt sein. Bei inaktivem Exzenter darf kein Material aus dem Spalt austreten. Regt der Exzenter die Klinge zum Schwingen an, so wird das Material lokal fluidisiert und tritt aus dem Spalt aus. Um einen homogenen Schichtauftrag sicherzustellen, muss neben dem Öffnungsspalt und der Drehzahl auch die Beschichtungsgeschwindigkeit eingestellt werden. Tabelle 4.3 fasst die standardmäßigen Einstellungen des Beschichters zusammen.

Tabelle 4.3: Spezifikationen Beschichter

Spezifikation	Einheit	Wert
Öffnungsspalt	mm	1,50
Drehzahl	$\frac{1}{\text{min}}$	4000
Geschwindigkeit	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	100

Soweit nicht anders erwähnt, werden sämtliche Versuchsreihen mit diesen Beschichtungsparametern durchgeführt.

Materialentsorgung

Im Laufe des Druckprozesses fällt eine geringe Menge überflüssiges Material an, welches aus der Prozesskammer entfernt werden muss. Bei der standardmäßigen Ausführung der Anlage befindet sich unterhalb des Nachfüllrohrs ein Gitter, in welches überflüssiges Material beim Nachfüllen in den Materialtank hineinfällt. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde dieses Gitter durch ein Blech verschlossen. Ebenso wurde die Materialförderung aus dem Materialtank deaktiviert. Diese beiden Maßnahmen stellen sicher, dass ausschließlich Primärmaterial direkt aus dem Trichter auf das Baufeld aufgetragen wird. Hierdurch können Störeffekte, die durch Alterung und Entmischung des SBS in der Anlage auftreten können, eliminiert werden. Überflüssiges Material, welches vom Beschichter über das Baufeld hinausgeschoben wird, fällt in den Materialfang.

4.3.4 Heizungssystem

In der standardmäßigen Anlagenausführung ist das 3-D-Drucksystem VX500 nicht mit einem Heizungssystem ausgestattet. Um die in Abschnitt 4.4.2 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 Noblelight GmbH, Kleinostheim, realisiert (Heraeus Noblelight GmbH 2015). Der Strahler ist an der x-Achse parallel zur Baufeldoberfläche montiert und kann gemeinsam mit dieser in y-Richtung über das Baufeld bewegt werden. Tabelle 4.4 listet die Spezifikationen des Heizungssystems auf.

Tabelle 4.4: Spezifikationen IR-Strahler

Spezifikation	Einheit	Wert
Reflektortyp	-	Spezialgoldreflektor
Bauform	-	B (beide Kanäle beheizt)
Nennleistung	W	2870
Beheizte Länge	mm	585
Wellenlänge	μm	1,4
Filamenttemperatur	$^{\circ}\text{C}$	1400 - 1800
Reaktionszeit	s	1 - 2

Ein steuerbarer Leistungssteller vom Typ HERATRON CB 1x15 der Heraeus Nobellight GmbH versorgt den IR-Strahler mit der designierten Heizleistung (Heraeus Noblelight GmbH 2010). Die Ausgangsleistung wird über ein 0 - 10 V Steuersignal vorgegeben. Die Eingabe der Leistungsdaten erfolgt über ein für diesen Anwendungszweck eigens entwickeltes Programm, welches in Abschnitt 4.3.5 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 Überfahr- geschwindigkeit bestimmt. Diese wurde standardmäßig auf den Wert von $0,05 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ festgesetzt. Variationen des Energieeintrags werden demzufolge ausschließlich über eine Anpassung der Strahlerleistung vorgenommen.

4.3.5 Prozesssteuerung und -überwachung

Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten ein Überblick über die Beschaffenheit und Funktionen der Anlagenkomponenten gegeben wurde, erfolgt in diesem Abschnitt die Beschreibung der Steuerung dieser Anlagenbestandteile und der implementierten Prozessüberwachung. Diese Funktionen werden zum einen von dem Anlagenrechner und zum anderen von dem Messrechner (vgl. Abbildung 4.5) ausgeführt.

Steuerung des Positions-, Fluid- und Materialsystems

Die Steuerung des Positions-, Fluid- und Materialsystems der VX500-Versuchsanlage erfolgt mithilfe des Anlagenrechners. Er ist mit der Software RAPIX 3D, FORWISS, Universität Passau, ausgestattet. Diese Software ist die Schnittstelle zum Anlagenbediener und dient dem Importieren und Positionieren von CAD-Daten, der manuellen Manipulation der Anlage sowie dem vollautomatisierten Drucken. Sämtliche Funktionalitäten von RAPIX 3D können dem Benutzerhandbuch entnommen werden (voxeljet AG 2009a).

Im Rahmen der Versuchsreihen war es notwendig über die Standardfunktionen der RAPIX 3D-Software hinaus Anpassungen an der Maschinensteuerung (Initialisierungsdateien `defr3d.ini_ap` und `VX500.ini_ap`) vorzunehmen. Ist eine Anpassung der Druckauflösung in x-Richtung dx notwendig, so wird diese in dem Schlüssel `f31_resolution` der `defr3d.ini_ap`

in der Einheit mm vorgenommen. Die Auflösung in y-Richtung dy ist aufgrund der Anordnung der Druckmodule zu 0,085 mm festgelegt. Die z-Auflösung dz entspricht der Schichtstärke, hier 0,250 mm. Um die Arbeitsfrequenz f_{DK} der Piezodüsen konstant bei 10 kHz zu halten, geht eine Anpassung der Druckauflösung stets mit einer entsprechenden Einstellung der Druckgeschwindigkeit v_x einher. Der Zusammenhang zwischen dx , v_x und f_{DK} geht aus folgender Formel hervor:

$$dx = \frac{v_x}{f_{DK}} \quad (3)$$

Die Anpassung der Druckgeschwindigkeit wird in der `VX500.ini_ap` im Schlüssel `Axis → x → db1_PrintSpeed` vorgenommen. Ist eine Anpassung der Heizparameter notwendig, so erfolgt diese in der `VX500.ini_ap` Datei unter der Kategorie `Heating`. Tabelle 4.5 listet die relevanten Schlüssel zur Einstellung der Heizparameter sowie die Standardeinstellungen auf:

Tabelle 4.5: Parameter Heizungssystem

Schlüsselname	Einheit	Wert (Standard)	Bedeutung
<code>bo1_Active</code>	-	true	Heizsystem aktiv / inaktiv
<code>in1_PosA</code>	mm	55	y-Position Vorheizen
<code>in1_PosB</code>	mm	900	y-Position Ende Heizfahrt
<code>in1_Preheat</code>	ms	3000	Vorglühzeit
<code>in1_SpeedB</code>	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	50	Geschwindigkeit Heizfahrt

Steuerung des Heizungssystems und Prozessüberwachung

Der Messrechner dient der Steuerung des Heizungssystems und der Prozessüberwachung. Hierzu ist der Rechner mit der Systemdesignsoftware NI LabVIEW, National Instruments Corporation, Austin, USA, ausgestattet. Dieser Rechner kommuniziert mit der NI-Hardware über eine USB-Schnittstelle. Tabelle 4.6 listet die NI-Hardware auf:

Tabelle 4.6: Hardwarekomponenten der Steuerung des Heizungssystems

Bezeichnung	Beschreibung (Spezifikation)
Finder 38.51.7.006.0050	Koppelrelais zum Auskoppeln des Anlagensignals <code>IR_A</code> bei <code>slice_done</code> (FINDER S.p.A. 2014)
NI cDAQ 9174	Chassis zur Montage der Komponenten im elektrischen Schaltschrank der VX500 (National Instruments Corp. 2011)
NI 9401	Digitaler Input zur Erfassung des Anlagensignals über Koppelrelais / Output zur Ansteuerung der WBK (National Instruments Corp. 2012)
NI 9263	0 - 10 V analoger Output zur Steuerung des Leistungsstellers HERATRON CB 1x15 von 0 - 100% (National Instruments Corp. 2009b)
NI 9213	Analoger Input für das Anschließen und Auslesen der 12 Thermoelemente (National Instruments Corp. 2009a)

Ausführliche Informationen zu den verbauten Komponenten können den entsprechenden Spezifikationen entnommen werden. Das Blockschaltbild befindet sich im Anhang (Abbildung 1). Die Verarbeitung der Steuer- und Messdaten erfolgt mit dem LabVIEW-Programm `IR-Strahler.exe`. Es ermöglicht die Erstellung von positions- und zeitabhängigen Leistungs-

profilen für den IR-Strahler, steuert den Auslöser der WBK und zeichnet die Signale von den 12 verbauten Thermoelementen auf. Abbildung 4.8 zeigt einen Screenshot des Programms.

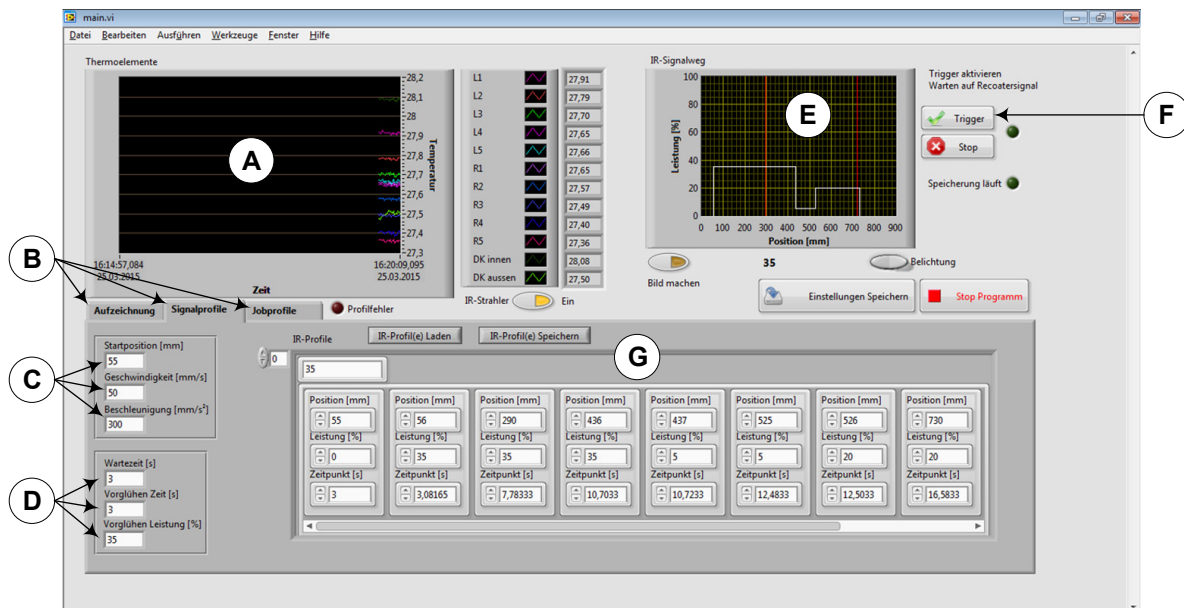


Abbildung 4.8: Screenshot des LabVIEW-Programms IR-Strahler.exe. A = Thermoelementanzeige, B = Reiterauswahl, C = Einstellungen Positionssystem, D = Warte- und Vorglühparameter, E = Visualisierung des Strahlerprofils, F = Trigger, G = Konfiguration Strahlerprofil

In dem oberen linken Fensterbereich befindet sich die graphische und digitale Visualisierung der Thermoelementdaten. Die Thermoelemente 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. Die in Abschnitt 4.3.5 beschriebenen Einstellungen im Heating Reiter der Initialisierungsdatei `vx500.ini_ap` müssen hierbei identisch mit den entsprechenden Vorgaben im LabVIEW Programm sein. Dies stellt die zeitliche Synchronisation und damit die korrekte Ansteuerung des IR-Strahlers sicher. 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° (ebs Automatisierte Thermographie und Systemtechnik GmbH 2015). Der Aufbau orientiert sich an der Arbeit von Wegner (2013). Er empfiehlt eine möglichst senkrechte Positionierung der WBK über dem Baufeld, um Messfehler zu minimieren. Dieser Anforderung wird mit dem realisierten Aufbau (vgl. Abbildung 4.5) entsprochen. 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 orts aufgelöste Temperaturprofile erzeugt werden.

Umgebungs-klima

Die Versuchsanlage befindet sich im Sandlabor der Versuchshalle des Lehrstuhls utg und ist somit veränderlichen klimatischen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Im Abschnitt 4.2.4 wurde erläutert, dass Wasser für das im 3-D-Druckprozess verwendete SBS als Lösungsmittel dient. Da Wasser ein ubiquitärer Stoff ist, kann angenommen werden, dass seine Konzentration in der Umgebung der Anlage und im Prozessraum Einfluss auf die Ausgangsgrößen nehmen. Für sämtliche Versuchsreihen wurde daher ein Klima möglichst nahe dem spezifischen Normal-klima von 23,0°C und einer relativen Luftfeuchte von 50% (DIN 2011) angestrebt. Jeweils zwei Temperatursensoren vom Typ DS18B20 und zwei Feuchtigkeitssensoren des Typs HIH-4010 Series zeichnen die klimatischen Verhältnisse innerhalb des Prozessraums und im Sandlabor auf. Die Spezifikationen dieser Sensoren sind (Maxim Integrated Products, Inc. 2008) und (Honeywell International Inc. 2007) zu entnehmen. Jede Minute werden diese vier Messwerte erfasst und auf dem Messrechner abgespeichert. Während der kalten Jahreszeit (Oktober bis April) hält ein Heizungsgebläse die Versuchshalle auf einer mittleren Temperatur von ca. 23°C. Aufgrund der trockenen Heizungs-luft muss die Luftfeuchtigkeit im Sandlabor zu dieser Jahreszeit mithilfe eines Luftbefeuchters künstlich gesteigert werden. Dazu dient ein Kaltverdunstungsgerät vom Typ LW45 der Venta-Luftwäscher GmbH, Weingarten. Im Gegensatz zur Heißverdunstung oder der Ultraschallvernebelung kommt es bei der Kaltverdunstung zu keiner Übersättigung der Luft mit Wasser. So lässt sich unerwünschte Kondensatbildung, z.B. auf elektronischen Komponenten der Versuchsanlage, vermeiden.

4.4 Prozessmodule

Zur Minimierung von Störgrößen sind sämtliche Arbeitsschritte eines Versuchs (Jobs) in entsprechenden Checklisten festgehalten. Die folgenden Abschnitte fassen die wesentlichen Punkte der Prozessvorbereitung (Pre-Prozess), des 3-D-Druckprozesses (In-Prozess) sowie der Nachbehandlung (Post-Prozess) und der Bewertung der hergestellten Prüfkörper zusammen. Die folgenden Ausführungen orientieren sich dabei an der chronologischen Abfolge der Prozessmodule innerhalb des Systems.

4.4.1 Pre-Prozess

Bereitstellung und Überprüfung der Materialien

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, erfolgt das Mischen des SBS vor den Versuchsreihen bei der voxeljet AG. Hier wird der Faktor Binderkonzentration c_B eingestellt. Die Einstellung der Binderkonzentration erfolgt mittels Einwaage. Der Formgrundstoff – Quarzsand – unterliegt natürlichen Schwankungen in seiner Morphologie und chemischen Zusammensetzung. Der Binder wird von einer externen Quelle bezogen und unterliegt lediglich einer visuellen Eingangskontrolle. Binder, der beispielsweise durch das Einwirken von Feuchtigkeit verklumpt ist, wird nicht verwendet. Das SBS wird nach dem Mischen bei der voxeljet AG in doppelwandige Kunststoffsäcke gefüllt und verschlossen. Am Lehrstuhl erfolgt das Umfüllen in verschließbare Kunststofftonnen (Gefahrgutverpackungen) in denen das SBS bis zum Gebrauch gelagert wird und vor unerwünschten klimatischen Einwirkungen geschützt ist.

Zu Beginn eines Jobs werden ca. 10 kg des SBS in den Einfülltrichter der Anlage gegeben. Die Bestimmung der SBS-Feuchtigkeit ϕ_{SBS} erfolgt durch Trocknen von 50 g des SBS in einer Trockenwaage vom Typ DBS der Firma Kern & Sohn GmbH. Die Trocknung findet bei 200°C über einen Zeitraum von 15 Minuten statt. Das verwendete Druckfluid wurde ebenfalls bereits in Abschnitt 4.2 eingeführt. Bevor es der Anlage zur Verfügung gestellt wird, muss gelöstes Gas aus dem Druckfluid entfernt werden, da Piezo-Druckköpfe besonders empfindlich gegenüber Luft- oder Gaseinschlüssen in den Düsen sind (Gebhardt 2013, S. 87). Hierzu wird es auf ca. 30°C erwärmt und für 15 min. bei einem Druck von maximal 100 mbar entgast. Nach diesem Vorgang kann es dem Fluidsystem der Anlage zur Verfügung gestellt werden. Die Konzentration des Druckfluids c_{DF} wird mit den identischen Trocknungsparametern wie zuvor bei der Bestimmung von ϕ_{SBS} bestimmt. Neben dem Druckfluid wird der Füllstand des Cleaner- und Waste-Behälters geprüft.

Prüfung und Vorbereitung des 3-D-Drucksystems

Vor Beginn eines Jobs müssen sämtliche Systeme der Anlage (vgl. Abschnitt 4.3) auf ihre korrekte Funktionsweise hin überprüft werden. Als erster Schritt übernimmt die Anlagensoftware RAPIX 3D die Überprüfung des Positionierungssystems mittels Abfragen der Positionen aller Achsen. Anschließend erfolgen das Drucken eines Testmusters und die Bestimmung der Druckkopfqualität Q_{DK} . Abbildung 4.9 zeigt den Druckkopf beim Drucken des Testmusters sowie drei verschiedene Testmuster, die auf pH-Indikatorpapier gedruckt wurden.

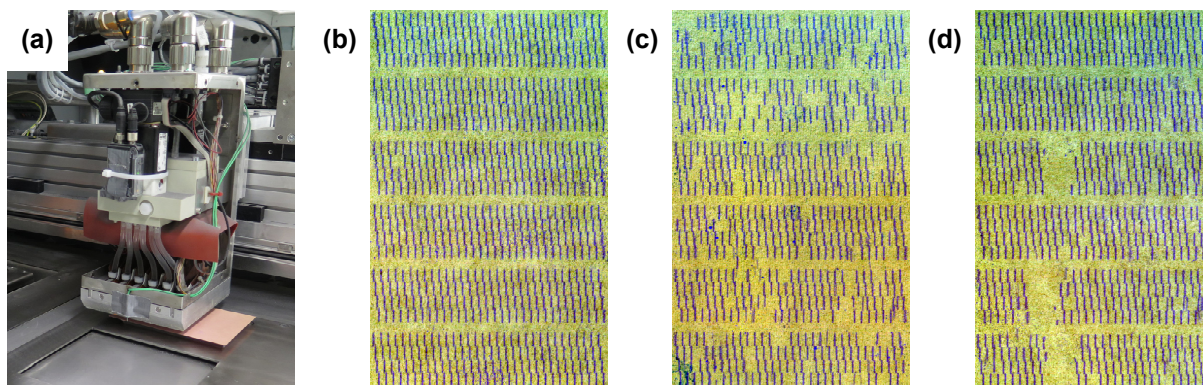


Abbildung 4.9: Druckkopf bei der Erstellung des Testmusters (a) sowie ein ordnungsgemäßes Druckbild (b) und charakteristische Druckbilder für fehlerhafte Druckkopfreinigung (c) oder fehlerhafte Unterdruckeinstellungen (d).

Jede Markierung entspricht dabei einer arbeitenden Düse des Druckkopfs. Im Idealzustand arbeitet die volle Düsenanzahl n_D von 768 Düsen der insgesamt 6 Druckmodule. In der Regel arbeiten vereinzelte Düsen nicht oder nicht korrekt. Dies äußert sich durch das Fehlen oder die falsche Position der entsprechenden Markierung auf dem Testmuster. Aus der Anzahl der fehlerhaft arbeitenden Düsen n_{FD} lässt sich die Druckkopfqualität Q_{DK} mithilfe folgender Formel berechnen:

$$Q_{DK} = \frac{n_D - n_{FD}}{n_D} \cdot 100 \quad (4)$$

Die Kriterien für einen ordnungsgemäß arbeitenden Druckkopf sind keine blockweisen Düsenausfälle und ein Q_{DK} -Wert größer 98%. Ist eine ordnungsgemäße Druckkopfqualität sichergestellt, erfolgt die Bestimmung der Tropfenmassen m_T und der Druckkopfstabilität S_{DK} . Diese ist essentiell, da es im Laufe der Tropfenerzeugung zu einer Veränderung der Düsenleistung oder einem Düsenausfall kommen kann. Eine mittig auf der z-Achse des 3-D-Druckers positionierte Präzisionswaage PCB 250-3 der Firma Kern & Sohn GmbH misst das Gewicht einer designierten Anzahl vom Druckkopf ausgesendeten Tropfen. Für die Tropfenmassenbestimmung wird der Druckkopf zunächst der Standardreinigung unterzogen. Anschließend werden von allen 768 Düsen jeweils die Tropfenanzahl n_T von 10.000 Tropfen erzeugt, in einer Schale aufgefangen und deren Gesamtgewicht m_{T1} gemessen. Die Erzeugung und Gewichtsbestimmung wird weitere vier Mal wiederholt, woraus die Werte für m_{T2} , m_{T3} , m_{T4} und m_{T5} resultieren. Die Tropfenmasse m_T gibt das mittlere Gewicht von 10.000 Tropfen an und wird nach folgender Formel berechnet:

$$m_T = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 m_{Tn} \quad (5)$$

Die Druckkopfstabilität S_{DK} quantifiziert die Veränderung der Tropfenmassen über den Verlauf der Erzeugung von 50.000 Tropfen. Dabei entsprechen 50.000 Tropfen circa der Tropfenanzahl, die beim Bedrucken einer Schicht mit 50% bedruckten Flächenanteil vom Druckkopf erzeugt werden müssen. Sämtliche im Rahmen der Versuchsreihen gedruckte Schichten liegen unterhalb einem Flächenanteil von 50%, werden also von dieser Maßnahme abgedeckt. Die Druckkopfstabilität S_{DK} errechnet sich nach folgender Formel:

$$S_{DK} = \frac{m_{T5}}{m_{T1}} \cdot 100 \quad (6)$$

S_{DK} -Werte $\geq 95\%$ spiegeln eine stabile Erzeugung von Tropfen wider. Können die geforderten Werte für S_{DK} und Q_{DK} nicht erreicht werden, so müssen Maßnahmen, wie beispielsweise eine Anpassung des Druckkopfunterdrucks, der Druckkopfspannung oder eine erneute Entgasung des Druckfluids durchgeführt werden.

Neben der Überprüfung des Druckkopfs muss im Rahmen des Pre-Prozesses die Jobbox vorbereitet und die Materialförderung überprüft werden. In die Jobbox wird das Entnahmegitter eingelegt, bevor sie in der Anlage positioniert und verriegelt wird. Der Boden der Jobbox wird über Verfahren der z-Achse auf die Starthöhe gebracht und manuell flächig mit dem SBS bedeckt. Hierzu kann der Beschichter verwendet werden. Um die korrekte Funktionsweise des Beschichters zu überprüfen, werden auf das ebene Materialbett drei Schichten aufgetragen. Hierbei muss der Beschichter eine homogene Materialwalze von ca. 5 mm Breite vor sich herschieben. Unregelmäßigkeiten in der Materialwalze, beispielsweise durch Materialverklumpungen im Beschichter, werden manuell entfernt.

Bereitstellung der CAD-Daten

Eine weitere Eingangsgröße des Pre-Prozesses ist die Übergabe der CAD-Daten an das 3-D-Drucksystem. Diese erfolgt mithilfe der Anlagensoftware RAPIX 3D. Sämtliche Versuche, die der empirischen Modellbildung dienen, wurden mit identischen CAD-Daten durchgeführt. Dieser Datensatz, der sogenannte *Standardjob*, wurde in Catia V5R19 konstruiert und enthält 15 Prüfkörper des Typs *Scheibe* und 15 Prüfkörper des Typs *Ring*. Die Anordnung der Probekörper und deren Abmessungen sind in Abbildung 4.10 dargestellt.

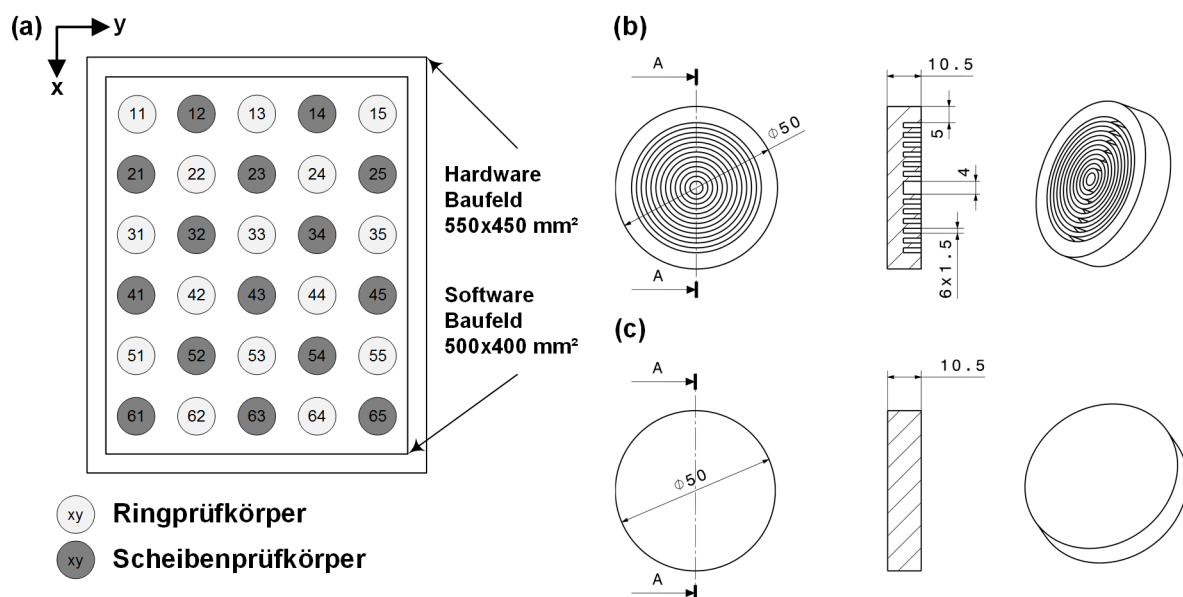


Abbildung 4.10: Anordnung der Prüfkörper in einer schematischen Draufsicht des Baufelds (a) und Konstruktionszeichnungen des Ringprüfkörpers (b) und des Scheibenprüfkörpers (c)

Die Prüflinge sind in einem Schachbrettmuster angeordnet und mittig bezüglich der x- und y-Abmessungen des Baufelds ausgerichtet. Die spezielle Geometrie der Prüfkörper dient der Ermittlung der Qualitätsmerkmale, die im Abschnitt 4.4.4 beschrieben sind. Die physikalische

Größe des Baufelds (Hardwarebaufeld) beträgt $550 \times 450 \text{ mm}^2$. Der bedruckbare Bereich – das Softwarebaufeld – hat die Abmessungen $500 \times 400 \text{ mm}^2$. 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. RAPIX 3D generiert die Bitmaps für jede der 82 Schichten und stellt sie dem 3-D-Drucker bereit.

Ist die ordnungsgemäße Funktionsweise der Komponenten überprüft und die Übergabe der CAD-Daten erfolgt, kann mit dem Einrichten des 3-D-Drucksystems fortgefahren werden. Da hierbei die Vorgabe der Faktoren erfolgt, die laut Systembeschreibung als Eingangsgrößen des In-Prozesses definiert sind, werden sie im folgenden Abschnitt 4.4.2 beschrieben.

4.4.2 In-Prozess

Einrichten der Faktoren

Der Faktor Fluideintrag E_F beschreibt das Verhältnis der Masse von eingetragenen Druckfluid m_F zur Masse des SBS m_{SBS} und lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$E_F = \frac{m_F}{m_{SBS}} \cdot 100 = \frac{\frac{m_T}{n_D \cdot n_T}}{\rho_{S,SBS} \cdot dx \cdot dy \cdot dz} \cdot 100 \quad (7)$$

Der Fluideintrag ergibt sich aus der zuvor bestimmten Tropfenmasse m_T und der Vorgabe der Ausdehnung und damit der Masse eines Voxels (dreidimensionales Pixel). Das Voxelvolumen lässt sich durch die variable Druckauflösung in x-Richtung dx frei definieren. Dabei muss die Druckgeschwindigkeit v_x entsprechend angepasst werden, um die Arbeitsfrequenz der Piezodüsen bei 10 kHz konstant zu halten. Die Voxelabmessungen in y- und z-Richtung sind auf 85 bzw. 250 μm festgelegt. Die Nennschüttdichte des SBS $\rho_{S,SBS}$ beträgt $1,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Vor Prozessbeginn werden die designierten Werte für dx und v_x errechnet und in die entsprechenden Initialisierungsdateien von RAPIX 3D eingetragen (vgl. Abschnitt 4.3.5).

Der Faktor Energieeintrag E_E wird über die Leistung des IR-Strahlers bei konstanter Überfahrtgeschwindigkeit eingestellt. Vor Prozessbeginn lässt sich im LabVIEW Programm das gewünschte Leistungsprofil auswählen. Die Notwendigkeit die Leistung in Abhängigkeit der Strahlerposition über dem Baufeld anzupassen, ergibt sich aus der konstruktiven Beschaffenheit des 3-D-Druckers. Aufgrund seiner eigenen Wärmekapazität bringt der IR-Strahler auch im abgeschalteten Zustand zusätzliche Wärme in das SBS ein. Während der Druckkopf eine Bahn (eine Druckkopfbreite) bedruckt, verharrt die x-Achse, an welcher der IR-Strahler montiert ist, kurzzeitig in einer Position. Dies führt während des Druckens zu linienförmigen Bereichen zusätzlichen Energieeintrags auf der Baufeldoberfläche. Dies wird durch die beschriebenen Leistungsprofile sowie einem alternierenden y-Versatz des Druckkopfs um eine halbe Bahnbreite kompensiert.

Der dritte Faktor, der im In-Prozess vorgegeben wird, ist die Zykluszeit t_Z . Sie beschreibt die benötigte Zeit zum Erstellen einer Schicht, also die Summe aus Druck-, Warte-, Belichtungs- und Beschichtungszeit. Belichtungs- und Beschichtungszeit werden im Rahmen der Arbeit konstant gehalten. Die Druckzeit hängt von der jeweiligen Druckgeschwindigkeit ab und wird ebenfalls

nahezu konstant gehalten. Demnach erfolgt die Variation der Zykluszeit lediglich über die Definition einer Wartezeit t_W der Anlage innerhalb eines Schichtzyklus. Diese beträgt minimal 3 Sekunden in denen der IR-Stahler vorglüht.

Prozessablauf und Datenerfassung

Nach dem Einrichten der Faktoren mittels RAPIX 3D und LabVIEW kann der Bauprozess gestartet werden. RAPIX 3D führt den Bauprozess vollautomatisch aus, sodass das 3-D-Drucksystem bis zum Abschluss des Jobs keine weiteren Bedieneingaben erfordert. Abbildung 4.11 veranschaulicht den Arbeitszyklus, der bei jeder Schicht wiederholt wird.

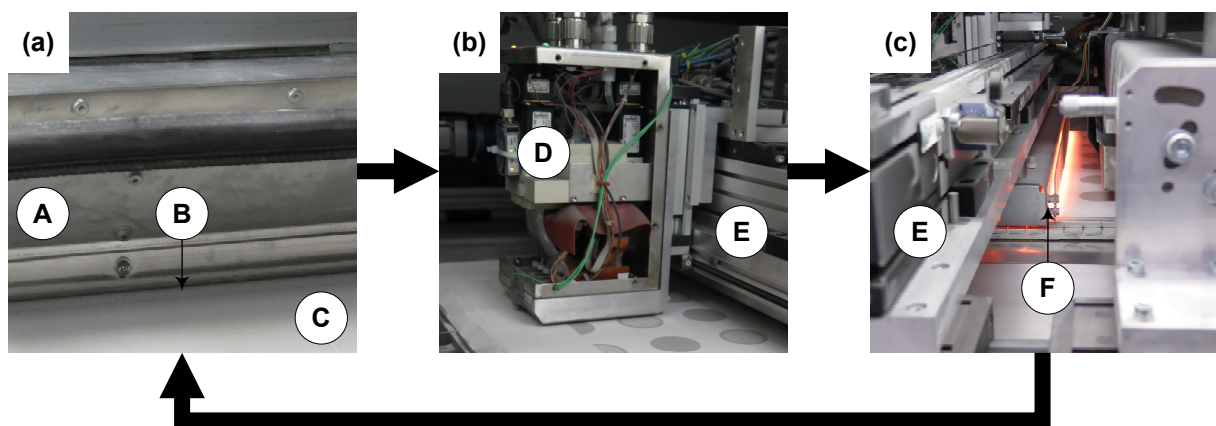


Abbildung 4.11: Schichtzyklus: Beschichten (a), Bedrucken (b) und Energieeintrag (c). A = Beschichter, B = Materialwalze, C = Baufeld, D = Druckkopf, E = x-Achse, F = IR-Strahler

Der Zyklus beginnt mit dem Auflegen einer 0,25 mm dicken SBS-Schicht durch den Beschichter von links nach rechts. Darauffolgend wird das Baufeld von rechts nach links und von vorne nach hinten mäanderförmig bedruckt. Nach dem Drucken kann in dem Zyklus eine Wartezeit vorgesehen werden. In den letzten drei Sekunden dieser Wartezeit glüht der IR-Strahler zunächst vor, bevor er das Baufeld mit einer Geschwindigkeit von $0,05 \frac{m}{s}$ und dem vorgegebenen Leistungsprofil von links nach rechts überfährt und erwärmt. Abbildung 4.12 veranschaulicht schematisch die einzelnen Reaktionsschritte, die während des In-Prozesses im SBS ablaufen.

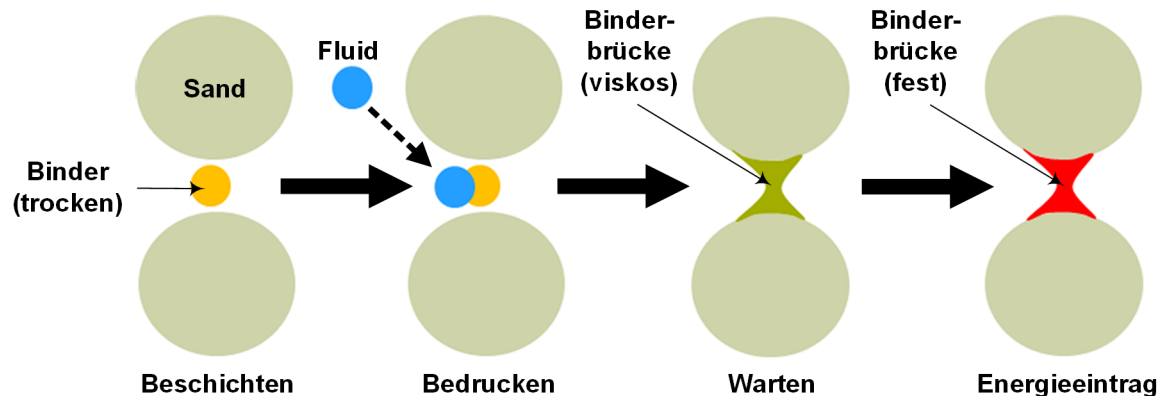


Abbildung 4.12: Schema der einzelnen Reaktionsschritte im SBS während eines Schichtzyklus

Der Beschichter trägt die trockene Mischung aus Sand und Binder auf. Über den Druckkopf wird das Fluid eingetragen und aktiviert das System. Es entsteht eine viskose Wasserglaslösung, die in der Lage ist, die umliegenden Sandkörner zu benetzen. Wird dem System durch das Einbringen von thermischer Energie Wasser entzogen, so verfestigen sich die Binderbrücken zwischen den Sandkörnern.

Neben den beschriebenen Faktoren nehmen noch eine Reihe weiterer Parameter Einfluss auf den In-Prozess und damit auch auf die Qualitätsmerkmale der Prüflinge. Diese Parameter lassen sich in die folgenden drei Kategorien unterteilen:

- Anlagenverhalten
- In-Prozess-Klima
- Störungen

Unter Anlagenverhalten sind geringfügige Veränderungen im Prozess zu verstehen, die beispielsweise durch das Erwärmen der Anlage während des Bauprozesses auftreten. Das In-Prozess-Klima beschreibt die klimatischen Verhältnisse innerhalb der Prozesskammer über die Dauer eines Jobs hinweg. Kleine Störungen, wie beispielsweise Verschmutzungen im Beschichter, die zu einer Inhomogenität während dem Materialauftrag führen, können während des Prozesses behoben werden. Die Auswirkungen von Veränderungen dieser Parameter auf die Prozess- und Prüfkörpereigenschaften werden im Rahmen der Fehlerbetrachtung in Abschnitt 6.1.2 erörtert.

Um sowohl die Einflüsse der Faktoren als auch die Auswirkungen von Parameterschwankungen auf die Ausgangsgrößen zu quantifizieren, wird während des In-Prozesses eine umfangreiche Datenerfassung betrieben. Zentraler Bestandteil der Datenerfassung während eines Jobs ist die Messung der Oberflächentemperaturen aller 30 Prüflinge mithilfe der Wärmebildkamera. Die Messung findet einmal pro Zyklus nach dem Bedrucken und vor dem Belichten statt. Abbildung 4.13 veranschaulicht das Messverfahren.

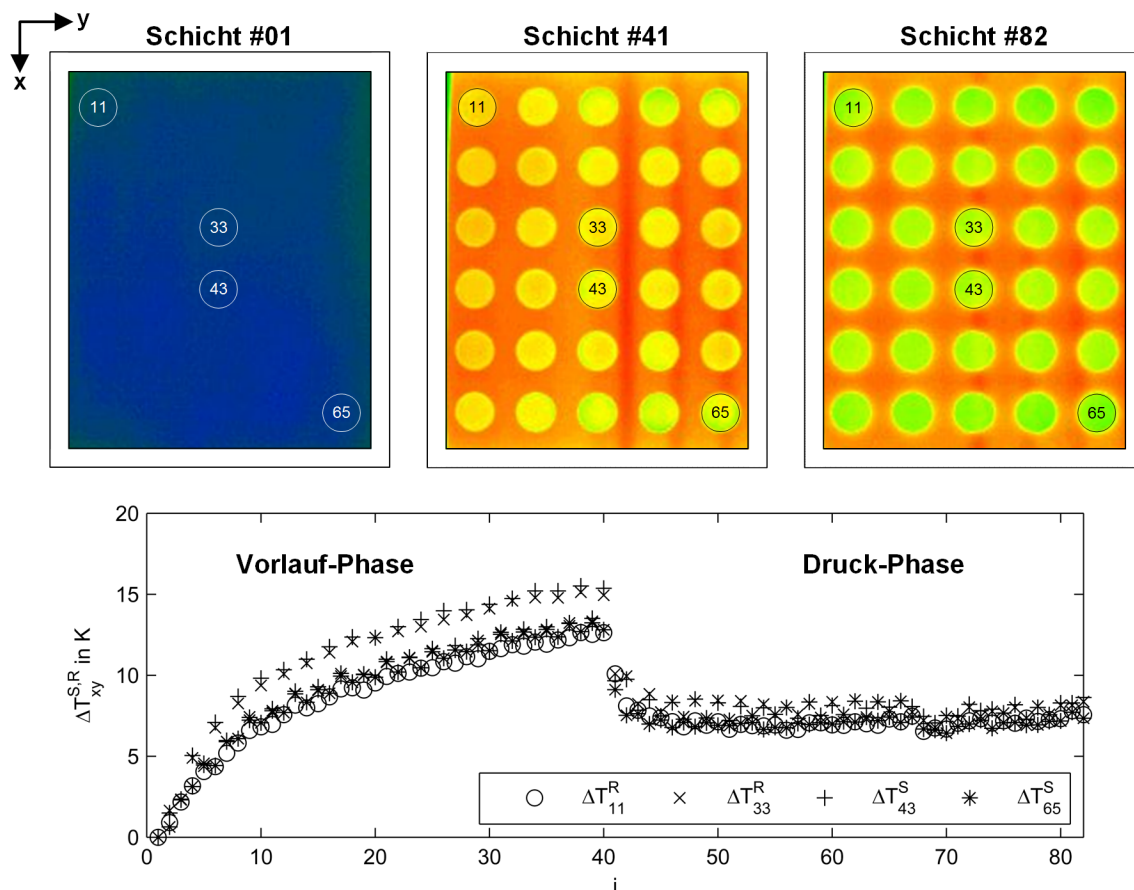


Abbildung 4.13: Messverfahren der Wärmebildkamera. Innerhalb jedes Zyklus zeichnet die Wärmebildkamera eine vollradiometrische Aufnahme der Baufeldoberfläche auf. Diese Aufnahmen können ausgewertet werden und bilden die Datenbasis für das zeit- und orts aufgelöste Temperaturprofil eines Jobs.

Die drei illustrierten Falschfarbenbilder der Wärmebildkamera geben die Temperaturverteilung auf dem Baufeld bei den Schichten $i = 1$ (Prozessbeginn), $i = 41$ (Beginn Probendruck) und $i = 82$ (Prozessende) wieder. Mithilfe der Software irMOTION collection kann die Temperaturinformation an jedem Pixel der vollradiometrischen Aufnahme ausgelesen werden. Beihilfswise wird bei der Umrechnung ein Emissionsgrad von 1 angenommen. Unter Annahme eines temperaturunabhängigen Emissionsgrades im untersuchten Temperaturintervall ist der tatsächliche Emissionsgrad irrelevant, da lediglich Temperaturdifferenzen betrachtet werden. Das Diagramm im unteren Teil von Abbildung 4.13 zeigt den charakteristischen Temperaturverlauf während eines Jobs exemplarisch an den Ringprüfkörpern 11 ($\Delta T_{11,i}^R$) und 33 ($\Delta T_{33,i}^R$) sowie den Scheibenprüfkörpern 43 ($\Delta T_{43,i}^S$) und 65 ($\Delta T_{65,i}^S$). Diese Daten stellen die Basis für die Berechnung der Hauptergebnisse der mittleren Prozesstemperatur der Scheibenprüfkörper ΔT^S und der mittleren Prozesstemperatur der Ringprüfkörper ΔT^R dar. Sie sind der Mittelwert aus den 15 Proben eines Typs gemittelt über die Temperaturen während der 42 Schichten der Druckphase. Die Berechnung erfolgt gemäß folgender Formeln:

$$\Delta T^S = \frac{1}{42} \sum_{i=41}^{82} \Delta T_{xy,i}^S \quad (8)$$

$$\Delta T^R = \frac{1}{42} \sum_{i=41}^{82} \Delta T_{xy,i}^R \quad (9)$$

Zusätzlich zu den Hauptergebnissen ΔT^S und ΔT^R werden im Laufe des In-Prozess eine Reihe weiterer Nebenergebnisse erfasst. Am Rande des Baufelds befinden sich 10 Typ K Mantelthermoelemente. Diese ragen in 5 mm Tiefe ca. 1 mm in das Baufeld hinein. Über das LabVIEW-Programm werden die Daten dieser Thermoelemente $T_{B(L1-L5)}$ und $T_{B(R1-R5)}$ während des gesamten In-Prozesses aufgezeichnet. Neben den zehn Baufeldthermoelementen zeichnet das LabVIEW Programm die Daten zwei weiterer Drahtthermoelemente auf. Diese befinden sich innerhalb ($T_{DK,I}$) und außerhalb ($T_{DK,A}$) des Druckkopfs. Die Positionen sämtlicher Thermoelemente wurden bereits in Abbildung 4.5 aufgeführt.

Einer der in Abschnitt 4.3.5 beschriebenen Klimasensoren befindet sich innerhalb der Prozesskammer oberhalb des Baufelds. Er erfasst jede Minute die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit während des In-Prozess. Als Nebenergebnisse lassen sich aus diesen Daten die mittlere In-Prozess-Temperatur T_{IP} und die mittlere, relative In-Prozess-Luftfeuchtigkeit φ_{IP} berechnen.

Die zu Beginn des Jobs bestimmte Tropfenmasse m_T kann sich im Laufe des Druckprozesses durch Ausfall einzelner Düsen oder durch temperaturbedingte Abnahme der Fluidviskosität sowohl in negative als auch in positive Richtung verändern. Um dies zu überwachen, kann die In-Prozess-Topfenmasse $m_{T,IP}$ erfasst werden. Für die Messung wird der Druckprozess für ca. 30 Sekunden pausiert. In dieser Zeit können in eine zuvor in der Prozesskammer platzierte Auffangschale 50.000 Tropfen dosiert und ihr Gewicht bestimmt werden. Der Faktor Fluideintrag kann nach dem Prozesswissen der voxeljet AG als stabil angenommen werden, wenn die Abweichung von $m_{T,IP}$ zu m_T innerhalb von $\pm 5\%$ liegt.

Neben den eingeführten, messtechnisch erfassbaren Größen werden sowohl von RAPIX 3D als auch von LabVIEW während des In-Prozess Logfiles geschrieben. Diese dienen der zeitlichen Dokumentation und können nach Prozessende ggf. Aufschluss über Unregelmäßigkeiten geben. Während des In-Prozess kann der Prozessraum mit einer Weitwinkelkamera ausgestattet werden, die sowohl Standbilder als auch Videos vom Prozess aufzeichnen kann.

4.4.3 Post-Prozess

Die im Rahmen der Arbeit untersuchten Faktoren des Post-Prozesses sind die Zeitspanne vor Trocknung t_{vT} , die Trocknungsdauer t_T und die Zeitspanne nach Trocknung t_{nT} . Hinzu kommt der Faktor der Trocknungstemperatur in der Klimakammer T_T . Abbildung 4.14 veranschaulicht die zeitliche Abfolge der Arbeitsschritte des Post-Prozesses.

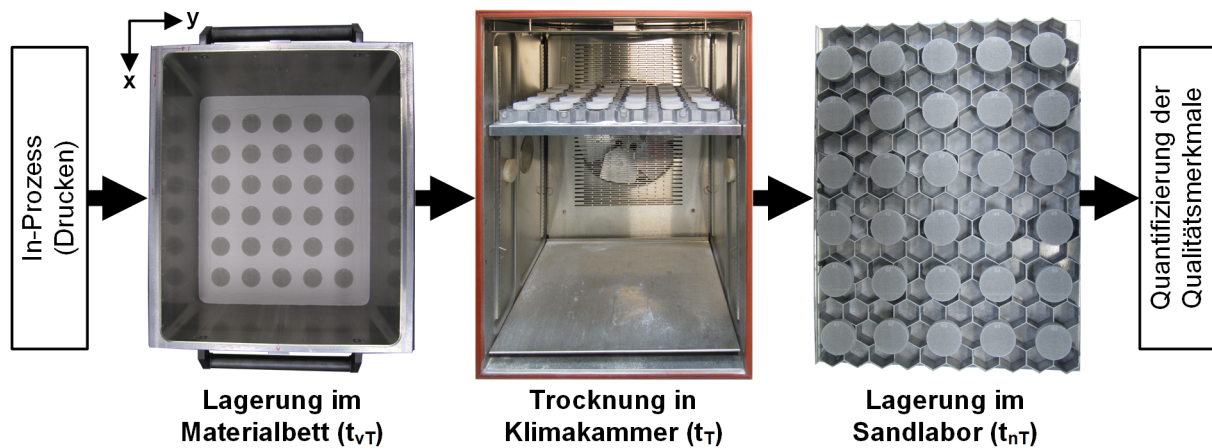


Abbildung 4.14: Abfolge der Post-Prozess Arbeitsschritte. Nach dem In-Prozess lagern die Prüflinge für die Zeitspanne t_{vT} in der Jobbox und sind von unbedrucktem Material umgeben. Der Transport in die Klimakammer erfolgt mithilfe des zuvor eingelegten Kunststoffgitters. Nach der Trocknung für die Zeitspanne t_T lagern die Prüfkörper für die Zeitspanne t_{nT} auf dem Kunststoffgitter im Sandlabor.

Nach Beendigung des In-Prozesses liegen die gedruckten Proben im Materialbett. Der Faktor t_{vT} beschreibt die Zeitspanne zwischen In-Prozess-Ende und der Trocknung in der Klimakammer. Diese erfolgt bei der Temperatur T_T für die Dauer von t_T . Der Faktor t_{nT} beschreibt die Zeitspanne zwischen der Trocknung und der Bestimmung der Qualitätsmerkmale. Während dieser Zeit lagern die Prüflinge im Sandlabor. Dieser Faktor wird variiert, um das Einwirken des Raumklimas während der Lagerung auf die Probeneigenschaften zu quantifizieren.

Neben den bewusst variierten Faktoren nimmt das Post-Prozess-Klima und das Handling der Proben Einfluss auf die Eigenschaften der Prüfkörper. Das Postprozessklima wird mittels der in Abschnitt Umgebungsklima beschriebenen Maßnahmen möglichst konstant gehalten. Aufschluss über die klimatischen Verhältnisse während des Post-Prozesses geben die Daten der Klimasensoren im Sandlabor. Die Post-Prozess Temperatur T_{PP} und die Post-Prozess relative Luftfeuchte φ_{PP} quantifizieren diese Ausgangsgrößen. Das vor Jobbeginn in die Jobbox eingelegte Kunststoffgitter minimiert Handlingeinflüsse erheblich. Mithilfe des Gitters können die Prüflinge nach dem Druckprozess ohne direkte Berührung in die Klimakammer überführt und nach der Trocknung wieder entnommen werden. Die erste direkte Berührung der Prüflinge erfolgt bei der anschließenden Quantifizierung der Qualitätsmerkmale.

4.4.4 Quantifizierung der Qualitätsmerkmale

Im Anschluss an den Post-Prozess erfolgt die Quantifizierung der Qualitätsmerkmale. Die folgenden Abschnitte beschreiben detailliert das Vorgehen und die verwendeten Prüfmittel zur Quantifizierung dieser Hauptergebnisse. Die Reihenfolge der Beschreibung erfolgt in chronologischer Analogie zur Prüfreihefolge. Die aufeinanderfolgenden Prüfungen an demselben Probekörper ermöglichen die orts aufgelöste Quantifizierung von vier Qualitätsmerkmalen an jedem Scheibenprüfkörper und drei weiterer an jedem Ringprüfkörper.

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 4.15 zeigt das manuelle Finishing und die Vermessung eines Scheibenprüfkörpers.

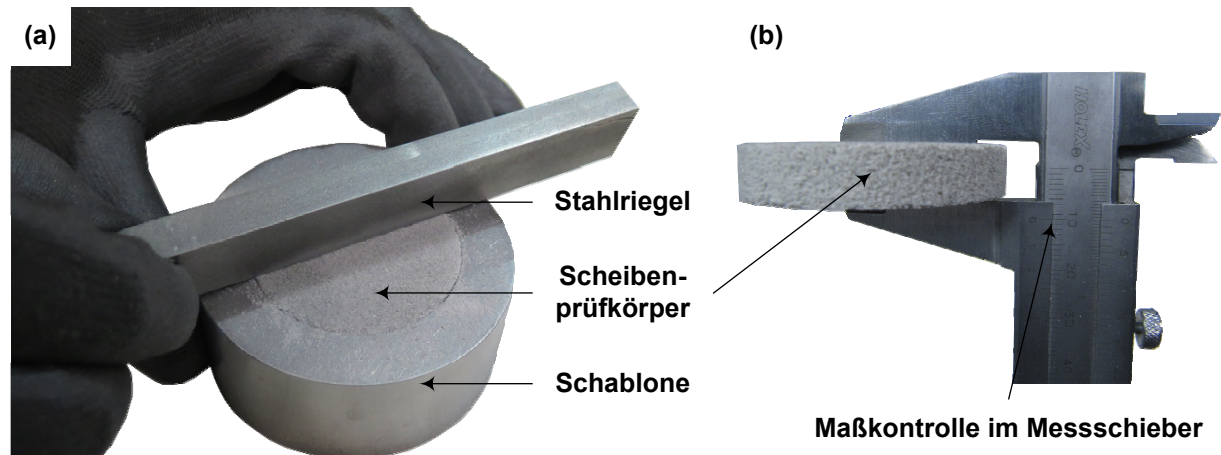


Abbildung 4.15: Im Zustand nach dem Post-Prozess hat der Prüfling ein undefiniertes Volumen, welches durch Abtragen in einer Stahlschablone (a) auf das Nennmaß gebracht wird. Die Nennmaßkontrolle (b) erfolgt mithilfe eines Messschiebers.

Nach dem Finishing-Vorgang wird die Masse des Scheibenprüfkörpers mithilfe der Feinwaage bestimmt. Das Hauptergebnis Dichte ρ^S berechnet sich als Mittelwert aus den Messdaten der 15 Scheibenprüfkörper eines Standardjobs mittels folgender Formel.

$$\rho^S = \frac{m^S}{V^S} \quad (10)$$

Dabei ist m^S der Mittelwert der gemessenen Gewichte der 15 Scheibenproben und V^S das Nennvolumen von 19635 mm³.

Permeabilität

Die Messung des Hauptergebnisses der Permeabilität K^S erfolgt gemäß VDG (1996) mit einem Gasdurchlässigkeitsprüfgerät der Firma Morek Multiserw, Brzeznicza, Polen, vom Typ LPiR-3e. Abbildung 4.16 zeigt das Prüfgerät sowie ein Funktionsschaubild.

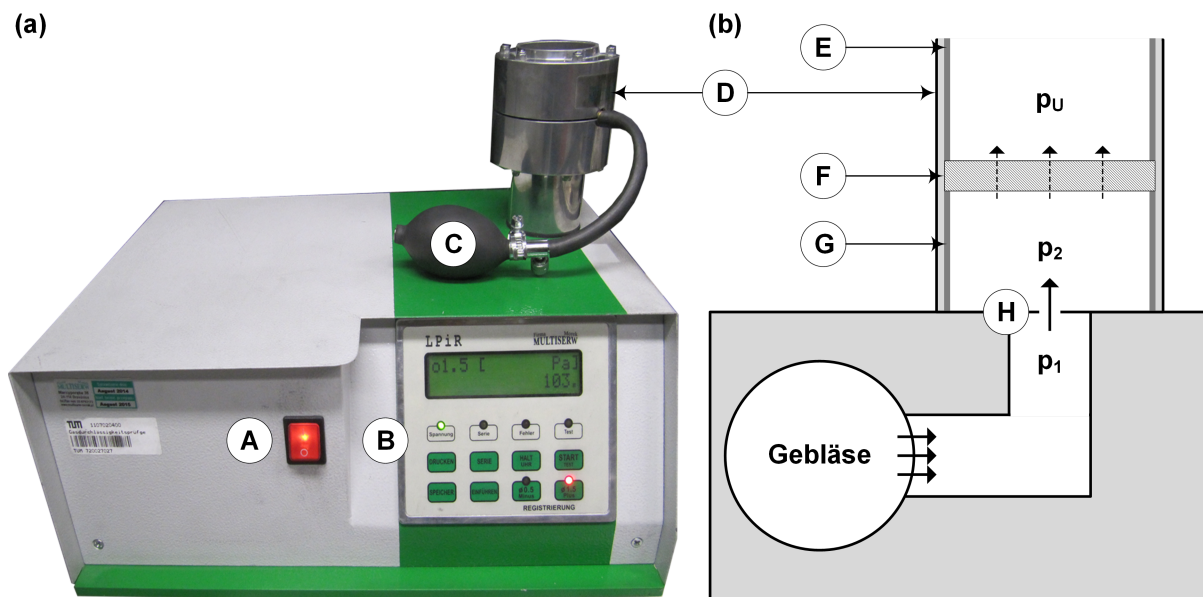


Abbildung 4.16: Fotografie und Funktionsschaubild des Gasdurchlässigkeitsprüfgeräts Typ LPIR-3e. A = Hauptschalter, B = Bedienpanel, C = Handpumpe, D = Dichtmanschette, E = Obere Positionierhülse, F = Scheibenprüfkörper, G = Untere Positionierhülse, H = Düse

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 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 Abbildung 2) kann $\Delta p_{1,2}$ in die Permeabilität K^N eines Normprüfkörpers von 50 mm Höhe nach (VDG 1997) gemäß folgender Formel angenähert werden.

$$K^N = \frac{-0,8725}{(\Delta p_{1,2})^2} + \frac{3,13}{\Delta p_{1,2}} - 0,002176 \quad (11)$$

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben wurde, hängt nach Formel (1) die Permeabilität linear von der durchströmten Länge des porösen Körpers ab. Da die Messung an dem Scheibenprüfkörper mit einer durchströmten Länge von 10 mm erfolgt, wird die Berechnung der Permeabilität eines Scheibenprüfkörpers K_{xy}^S entsprechend der Prüfkörpergeometrie angepasst. Dabei gilt:

$$K_{xy}^S = \frac{K^N}{5} \quad (12)$$

In Abbildung 4.17 ist die Permeabilität K über die gemessene Druckdifferenz $\Delta p_{1,2}$ aufgetragen. Das Diagramm enthält die Umrechnungsdaten aus der Herstellertabelle und die Näherungen für den Normprüfkörper mit 50 mm Höhe (K^N) und den Scheibenprüfkörper von 10 mm Höhe (K_{xy}^S).

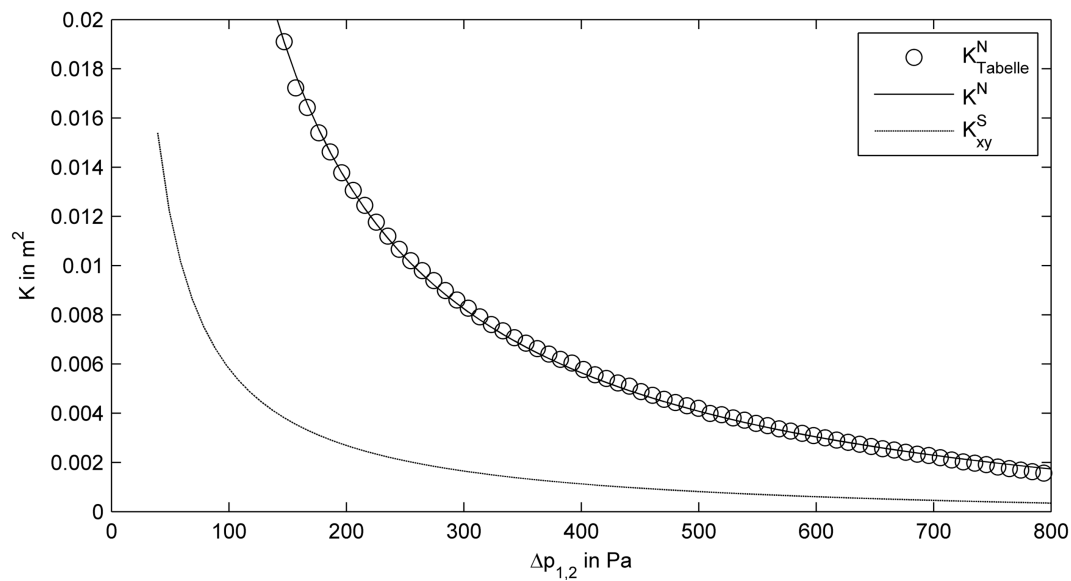


Abbildung 4.17: Grafische Darstellung der Umrechnung von $\Delta p_{1,2}$ in K des Geräteherstellers sowie quadratische Näherungen für die Permeabilität eines Norm- und Scheibenprüfkörpers.

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

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 (vgl. Abschnitt 2.3.2) Anwendung, der im Folgenden als *Scheibentest* bezeichnet wird. Das Prinzip der Lagerung auf drei Punkten und der Lasteinleitung über den Probenmittelpunkt bleiben unverändert. Der in Ramakrishnan et al. (2014) verwendete Aufbau erwies sich als anfällig für mechanisches Verkleben. 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 4.18 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.

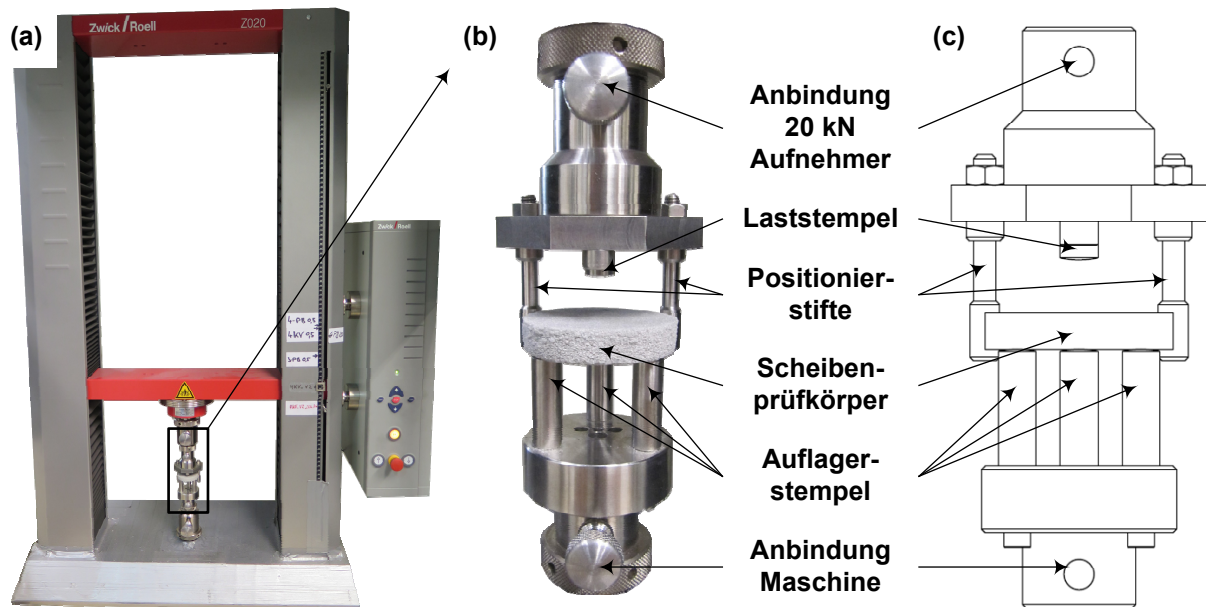


Abbildung 4.18: Universalprüfmaschine Z020 (a) mit eingebauter Scheibentest-Aufnahme (b) sowie einer schematischen Darstellung der Prüfsituation (c)

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 in Abschnitt 2.3.2 eingeführte Proportionalitätsfaktor 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 $1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ 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 4.19 zeigt beide Seiten eines charakteristisch gebrochenen Scheibenprüfkörpers.

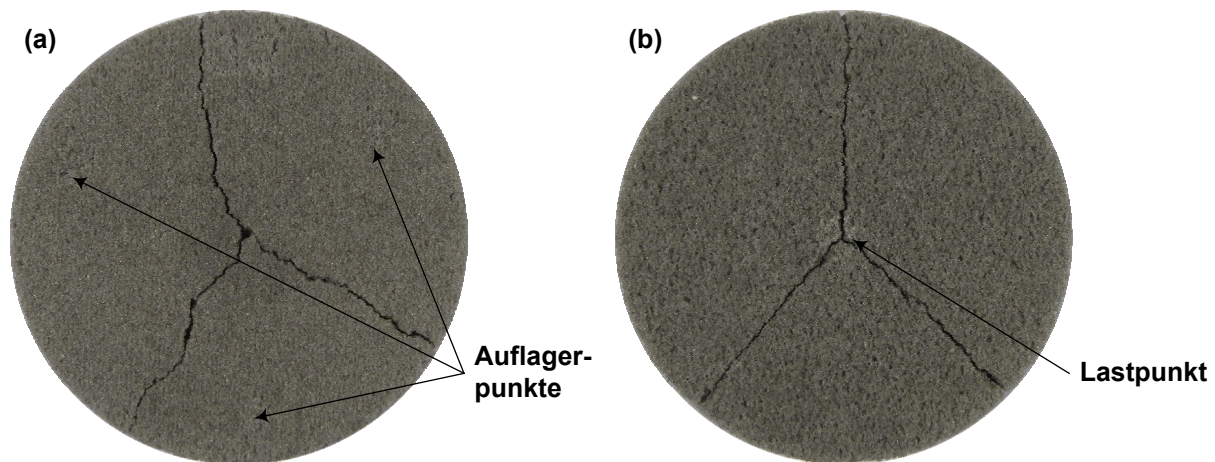


Abbildung 4.19: Charakteristisches Bruchbild eines Scheibenprüfkörpers von der Auflagerseite (a) und der Lastseite (b)

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 (vgl. Abbildung 2.11) auf.

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

Feuchtegehalt

Der letzte Charakterisierungsschritt bei der Bewertung der Scheibenprüfkörper ist die Bestimmung des Feuchtegehalts. Diese erfolgt unter identischen Bedingungen wie die in Abschnitt 4.4.1 beschriebene Bestimmung der SBS-Feuchtigkeit. 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 fortgefahen werden.

Curlneigung

Im Abschnitt 2.3.3 wurde beschrieben, dass bei thermisch unterstützten, additiven Fertigungsverfahren häufig mit Bauteilverzug im Bauprozess, dem sogenannten *Curl* zu rechnen ist. 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 4.20 zeigt am Beispiel von

fünf repräsentativen Proben wie sich Curl bei der optischen Bewertung des Ringprüfkörpers äußert.

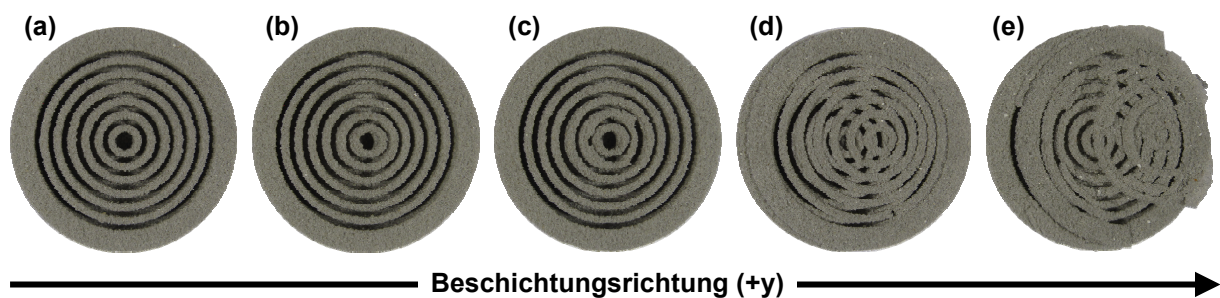


Abbildung 4.20: Unterschiedliche Ausprägungen von Curl am Beispiel von fünf repräsentativen Ringprüfkörpern. Kein Curl (a), minimale Verschiebung (b), leichte Verschiebung (c), starke Verschiebung (d) und zerstörte Ringprobe (e).

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.

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 größt möglicher Sorgfalt vom Kunststoffgitter 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_{xy}^R ermittelt. Abbildung 4.21 zeigt jeweils zwei Ringprüfkörper vor und nach dem Finishingvorgang.

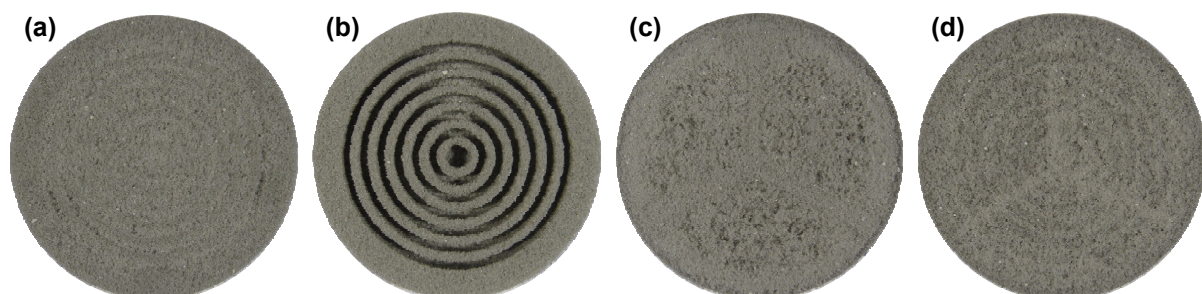


Abbildung 4.21: Ringprüfkörper vor und nach dem Finishing mit Druckluft. Bei geringen Auftreten von Fluidmigration (a) ist das Material in den Stegzwischenräumen ungebunden und kann ausgeblasen werden (b). Bei starker Fluidmigration (c) ist das Material gebunden und kann nicht durch das Finishing mit Druckluft entfernt werden (d).

Je stärker Fluidmigration auftritt, desto mehr Material bleibt nach dem Abblasen 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 $\Delta m_{F,xy}^R$ drückt aus, wie viel Prozent seine Masse über der Sollmasse m_S^R des Ringprüflings liegt:

$$\Delta m_{F,xy}^R = \frac{m_{xy}^R}{m_S^R} \cdot 100 - 100 \quad (13)$$

mit

$$m_S^R = \rho^S \cdot V^R \quad (14)$$

Aus der zuvor durchgeführten Charakterisierung der Scheibenprüfkörper ist die Dichte ρ^S der gedruckten Prüfkörper bekannt. Die Dichte von Scheiben- und Ringprüfkörpern wird als identisch angenommen. Das Volumen V^R des Ringprüfkörpers kann den CAD-Daten entnommen werden und beträgt 16890 mm^3 .

Das Hauptergebnis Fluidmigration Δm_F^R gibt den Mittelwert aller bewerteter Ringprüfkörper eines Standardjobs (i.d.R. 15 Stück) wieder.

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 4.22 veranschaulicht wird.

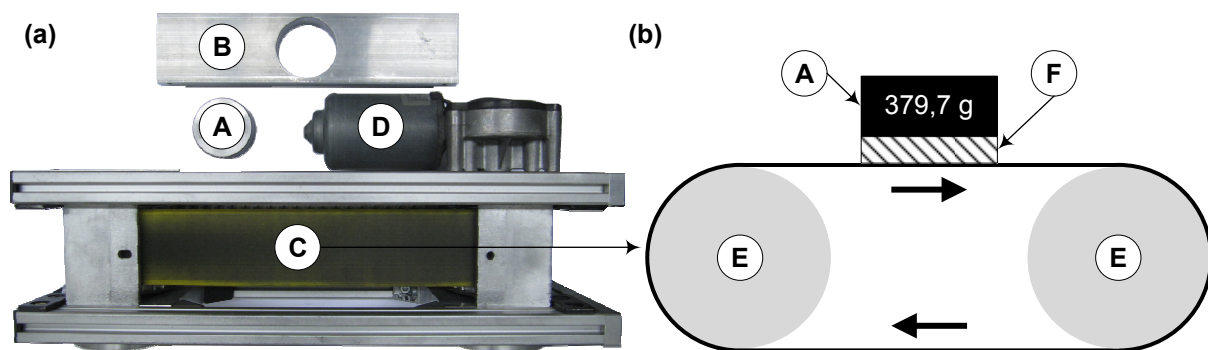


Abbildung 4.22: Reale Ausführung des Abriebprüfgeräts in der Draufsicht (a) und Schema der Funktionsweise in der Seitenansicht (b). A = Referenzgewicht, B = Halterung, C = Abriebband, D = Antrieb, E = Zahnräder, F = Ringprüfkörper

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 ($m_{xy}^{R'}$) über die sich mittels folgender Formel der Abrieb $\Delta m_{A,xy}^R$ jeder der 15 Ringprüfkörper bestimmen lässt.

$$\Delta m_{A,xy}^R = \frac{m_{xy}^R - m_{xy}^{R'}}{m_{xy}^R} \cdot 100 \quad (15)$$

Das Hauptergebnis Abrieb Δm_A^R gibt den Mittelwert aller bewerteten Ringprüfkörper eines Standardjobs wieder.

4.4.5 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.

4.5 Versuchsplan

Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht über die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche.

4.5.1 Homogenität und Reproduzierbarkeit

Die erste Grundvoraussetzung zur Durchführung der Faktorvariation, die dem empirischen Modell des Systems zugrunde liegt, ist eine hinreichende Homogenität der Prüfkörpereigenschaften in Bezug auf ihre Position im Baufeld. Alle eingeführten Ausgangsgrößen des Systems unterliegen Schwankungen, die eine statistische Absicherung in Form einer hinreichenden Probenanzahl notwendig machen. Des Weiteren soll das Modell Gültigkeit für Prüfkörpereigenschaften unabhängig von ihrer Position im Baufeld besitzen. Diesen beiden Anforderungen wird mit dem in Abschnitt 4.4.1 eingeführten Standardjob entsprochen. Jedes Hauptergebnis ist der Mittelwert aus 15 Einzelbewertungen des jeweiligen Probentyps. Diese große Probenanzahl ermöglicht eine aussagekräftige Ermittlung der Streuung in Form der Standardabweichung. Um die Standardabweichung innerhalb eines Job möglichst gering zu halten, wurden sämtliche Prozessschritte bezüglich der Baufeldhomogenität optimiert. Die wesentlichen Maßnahmen waren:

- Homogenisierung des Energieeintrags
- Sicherstellung der Druckkopfstabilität
- Bestimmung der In-Prozess-Schuttdichte

Die Homogenisierung des Energieeintrags erfolgte primär mithilfe der Daten der Wärmebildkamera. Hier dienen die in Abschnitt 4.4.2 eingeführten Hauptergebnisse ΔT^S und ΔT^R als Messgrößen. Bei aktivem IR-Strahler sollen konstante Versuchsbedingungen während der Herstellung der Prüflinge sichergestellt sein. Des Weiteren ist eine homogene Ausprägung der Prozess-, und Prüflingeigenschaften in Bezug auf Ihre Position im Bauraum anzustreben. Mit der Entwicklung eines positionsabhängigen IR-Strahlerprofils, welches diese beiden Anforderungen erfüllt, konnte die Basis für die Variation der thermischen Prozessbedingungen geschaffen werden.

Neben einem kontrolliertem Energieeintrag ist das prozesssichere Einbringen des Druckfluids von größter Bedeutung für die Herstellung aussagekräftiger Prüfkörper. Maßnahmen zur Sicherstellung eines korrekt arbeitenden Druckkopfs wurden bereits in Abschnitt 4.4.1 beschrieben. Instabilitäten beim Fluideintrag spiegeln sich sehr deutlich in der Ergebnisgröße Festigkeit wider. Daher wird diese Größe exemplarisch für eine Gegenüberstellung eines instabil und eines stabil arbeitenden Druckkopfs ausgewählt.

Der Materialauftrag durch einen Beschichter führt zu einer charakteristischen Schüttdichte des SBS innerhalb der Jobbox. Da diese In-Prozess-Schüttdichte einen signifikanten Einfluss auf Qualitätsmerkmale wie Dichte, Permeabilität und Fluidmigration hat, muss die Homogenität jener sichergestellt sein. Die Bestimmung der In-Prozess-Schüttdichte wurde mithilfe eines angepassten Standardjobs durchgeführt. Dieser Job enthält 30 Scheibenproben in der identischen Anordnung wie der des Standardjobs. Mittels der *Skin-Core* Funktionalität der RAPIX 3D Software wird lediglich eine 1 mm dünne Randschale (*Skin*) der Scheibenproben mit den Prozesseinstellungen des Referenzjobs (vgl. Tabelle 4.7) bedruckt. Das Innere der Scheibenproben (*Core*) bleibt unbedruckt und schließt ein SBS-Volumen, welches die In-Prozess-Schüttdichte aufweist. Durch Vermessung, Gewichtsbestimmung und Abzug der aus den Referenzjobs bekannten Dichte der Randschale, lässt sich die In-Prozess-Schüttdichte ermitteln. Die Ergebnisse dieser Optimierungsmaßnahmen zur Verbesserung der Homogenität innerhalb des Bau-raums werden in Abschnitt 5.1 dargestellt.

Neben der Homogenität innerhalb der Jobbox ist die zweite wesentliche Voraussetzung für eine aussagekräftige Faktorenvariation eine hinreichende Reproduzierbarkeit der Ergebnisgrößen von Versuchen, die mit identischen Faktoren durchgeführt wurden. Neben den Faktoren nimmt eine Reihe weiterer Parameter, die unvermeidbaren Schwankungen unterliegen, Einfluss auf den Prozess und die Prüfkorpereigenschaften. Um diese Streuungen zu quantifizieren und Parametereinflüsse zu bewerten, wurde ein Referenzjob definiert. Der Referenzjob ist ein Standardjob mit folgenden Faktoreinstellungen:

Tabelle 4.7: Faktoreinstellungen des Referenzjobs

Faktor	Einheit	Wert
Binderkonzentration	%	10
Fluideintrag	%	10
Energieeintrag	kJ	4,337
Zykluszeit	s	72
Zeitspanne vor Trocknung	h	0,25
Zeitspanne Trocknung	h	1
Zeitspanne nach Trocknung	h	1
Temperatur Trocknung	K (°C)	393 (120)

Die regelmäßige Wiederholung und Bewertung des Referenzjobs im Laufe der Versuchsreihen dieser Arbeit minimieren die Wahrscheinlichkeit, dass unkontrollierbare oder unbekannte Parameter signifikanten Einfluss auf den Prozess und die Prüfkorpereigenschaften nehmen.

4.5.2 Faktorenvariation

Gemäß der Zielsetzung soll im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit ein empirisches Modell zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen des in Abschnitt 4.1 beschriebenen Systems erstellt werden. Die hier getroffene Unterteilung der Eingangsgrößen in Faktoren und Parameter beruht auf einschlägiger Literatur (vgl. Abschnitte 2.1 und 2.2), erfahrungsbasierten Prozesswissen der voxeljet AG sowie den experimentellen Rahmenbedingungen der Versuchsanlage. Abbildung 4.23 teilt die Eingangsgrößen des Systems qualitativ nach der erwarteten Systemantwort und dem Aufwand einer gezielten Variation ein.

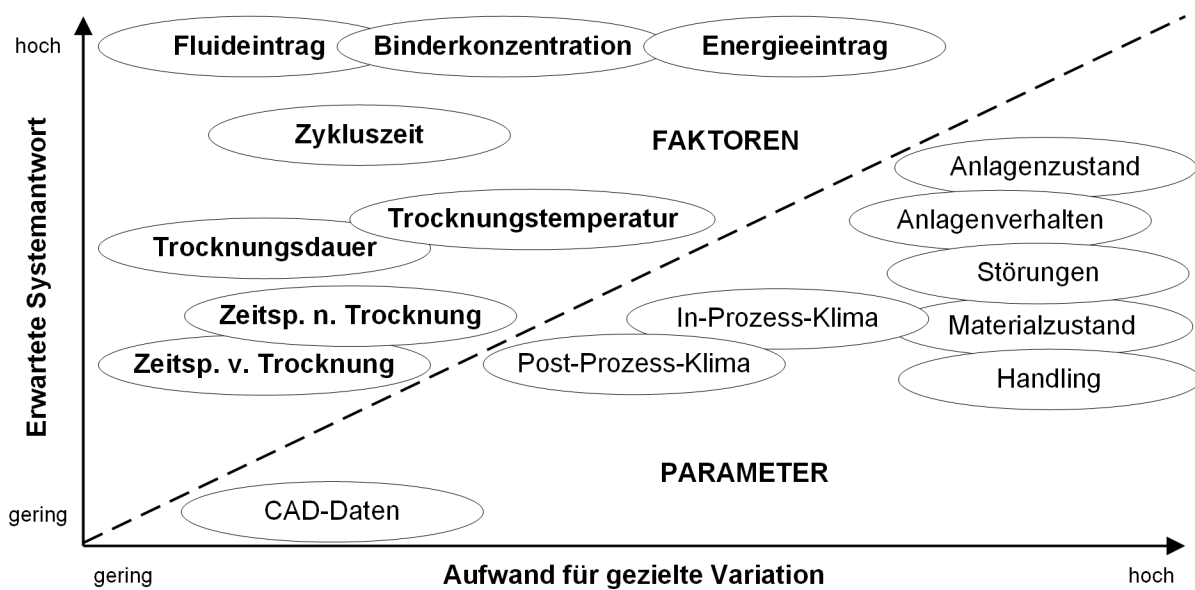


Abbildung 4.23: Einteilung der Eingangsgrößen des Systems in Faktoren und Parameter

Die aufgeführten Parameter fassen jeweils eine Reihe von Einflussgrößen zusammen, die im Rahmen der empirischen Modellbildung möglichst konstant gehalten werden sollen. Eine Variation dieser Parameter wurde aufgrund eines geringen erwarteten Einflusses auf die Ausgangsgrößen oder aufgrund eines nicht rechtfertigbaren Aufwands für eine gezielte Variation ausgeschlossen.

Eine Variation der Faktoren hingegen bringt einen darstellbaren experimentellen Aufwand mit sich. Gleichzeitig ist bei einer Variation dieser Faktoren eine deutliche Systemantwort in Form von Veränderungen der Ausgangsgrößen des Systems zu erwarten. Ausgehend von den Faktoreinstellungen des Referenzjobs erfolgt die Variation einzelner Faktoren in jeweils eigenen Versuchsreihen. Dabei bildet der Referenzjob einen Zentralpunkt und ist somit Teil jeder der durchgeführten Faktorvariationen. Tabelle 4.8 gibt eine Übersicht über die Faktoren und Stufen des Versuchsplans. Dabei sind die Stufen des Referenzjobs fett gekennzeichnet.

Tabelle 4.8: Faktoren und Stufen des Versuchsplans. Die Faktorenwerte des Referenzjobs sind fett hervorgehoben

Faktor	Einheit	Wert
Binderkonzentration	%	5; 7,5; 10 ; 12,5; 15
Fluideintrag	%	5, 6, 8, 10 , 12, 15
Energieeintrag	kJ	0; 1,835; 4,337 ; 7,280; 11,205
Zykluszeit	s	72 ; 192
Zeitspanne vor Trocknung	h	0,25 ; 24
Zeitspanne Trocknung	h	0,25; 1 ; 4
Zeitspanne nach Trocknung	h	1 ; 24; 168
Temperatur Trocknung	K (°C)	393 (120) ; 453 (180)

Die Variation der Faktoren erfolgt einzeln, wobei alle anderen Faktoren auf der Stufe des Referenzjobs konstant gehalten werden. Dieses Vorgehen ermöglicht die Erstellung eines robusten empirischen Modells ohne Berücksichtigung von Wechselwirkungen.

4.5.3 Ergänzende Versuchsreihen

Neben den Versuchsreihen zur Erstellung des empirischen Modells wurden weitere Versuche durchgeführt, die besondere Eigenheiten des Prozesses, der Prüfmethodik und der Prüfkörpereigenschaften belichten sollen.

Einfluss der y-Druckrichtung

In Abschnitt 4.4.2 wurde der Arbeitszyklus der Anlage während einer Schicht beschrieben. Dieser sieht folgende Richtungen vor:

- Beschichten von links nach rechts
- Bedrucken von rechts nach links
- Belichten von links nach rechts

Im Rahmen der Optimierung des Heizsystems des 3-D-Druckers konnte mit dieser Abfolge die größte Homogenität des Energieeintrags in das Baufeld erreicht werden. Bei dieser Konfiguration laufen das Beschichten und das Bedrucken in entgegengesetzten Richtungen ab. Dadurch kommt es in Abhängigkeit der y-Position eines Prüfkörpers zu unterschiedlichen Zeitspannen zwischen Beschichten und Bedrucken. Durch das Umkehren der y-Druckrichtung (von links nach rechts) kann der Einfluss auf den Druckprozess sowie die Qualitätsmerkmale bestimmt werden.

Untersuchung der Anisotropie in z-Richtung

Der Standardjob erzeugt Ring- und Scheibenprüflinge, deren Hauptausdehnung sich in x-y-Richtung, also parallel zu den aufgetragenen Materialschichten, erstrecken. Dementsprechend

gibt das empirische Modell Aufschluss über die Eigenschaften der Prüfkörper, die in dieser Orientierung hergestellt werden. Beispielsweise quantifiziert die Hauptergebnisgröße σ_B^S vornehmlich den Zusammenhalt der Sandpartikel in x-y-Richtung. Um eine mögliche Anisotropie der Qualitätsmerkmale in z-Richtung aufzeigen zu können, wurden zwei Jobs erstellt, in dem die Prüfkörper jeweils um 90° um die x- bzw. y-Achse gedreht wurden. Abbildung 4.24 visualisiert die Prüfkörperanordnung für die betreffenden Versuche.

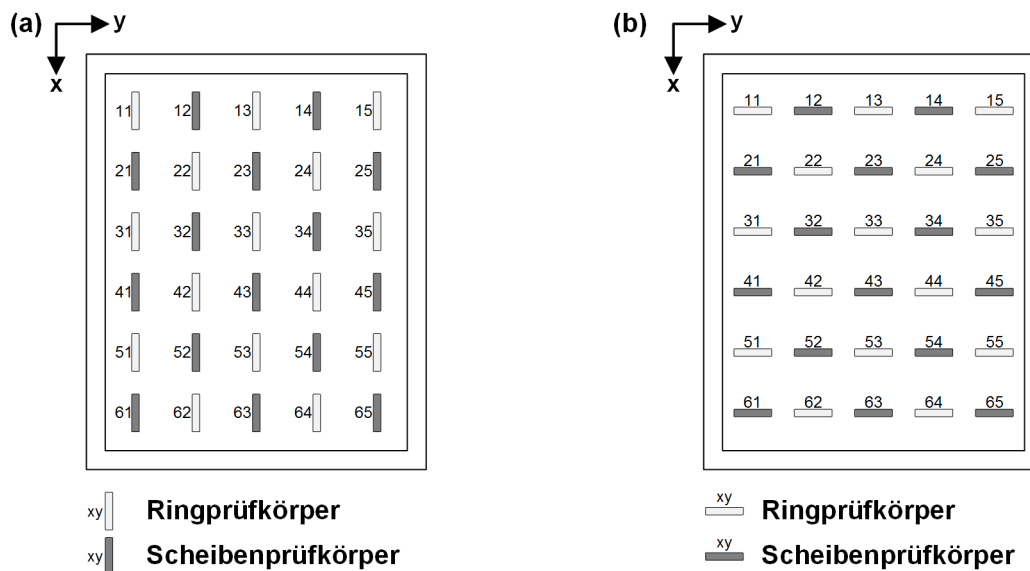


Abbildung 4.24: Orientierung der Ring- und Scheibenprüfkörper jeweils 90° um die x-Achse (a) und um die y-Achse (b) rotiert zur Untersuchung der Anisotropie in z-Richtung

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgt mit den Faktoreinstellungen des Referenzjobs. Aufgrund der Rotation der Proben ergibt sich – inklusive der Vorlaufphase – eine Schichtanzahl von 240 statt der 82 Schichten des Standardjobs. Die Bewertung der Prüflinge erfolgt analog zu der in Abschnitt 4.4.4 beschriebenen Quantifizierung der Qualitätsmerkmale.

Detektion von prozessbedingten Schwachstellen

Aufgrund der Lasteinleitung im Scheibentest kommt es beim Bruch der Scheibenprüfkörper zu einem charakteristischen Bruchbild (vgl. Abb. 4.19). Befindet sich jedoch eine Ungänze in der Probe, so kommt es zu einer Abweichung vom charakteristischen Bruchbild und zum Versagen entlang dieses Fehlers. Zur Verdeutlichung der Möglichkeit solche Ungängen innerhalb von Prüflingen mittels Scheibentest zu detektieren, wurden zwei Jobs mit jeweils 30 Scheibenprüfkörpern unter Referenzeinstellungen hergestellt. Die Ungängen wurden dabei im Rahmen des Pre-Prozess in die CAD-Daten der Prüflinge eingebracht. Abbildung 4.25 zeigt die schematischen Ansichten der beiden Jobs.

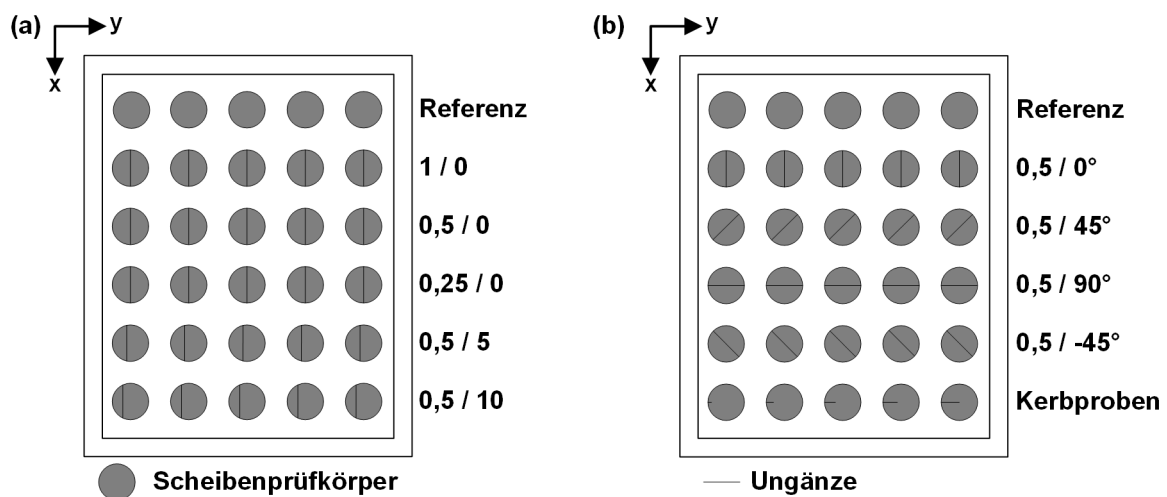


Abbildung 4.25: Größe und Orientierung der eingebraten Ungänzen

Sämtliche Probentypen werden in fünffacher Ausführung hergestellt. Der erste der beiden Jobs dieser Versuchsreihe (a) enthält Scheibenprüfkörper ohne Ungänze (Referenz) sowie Linienfehler von 1, 0,5 und 0,25 mm Ausdehnung, die durch den Probenmittelpunkt verlaufen. Des Weiteren umfasst der Job Scheiben, die einen Fehler von 0,5 mm Breite in einem Abstand vom Mittelpunkt von 5 bzw. 10 mm enthalten. Der zweite Job dieser Versuchsreihe (b) enthält neben der Referenzreihe Proben, die eine Ungänze von 0,5 mm Breite in der Orientierung von 0°, 45°, 90° und -45° bezüglich der x-Achse aufweisen. Die x6-Reihe des Jobs enthält Proben, die mit einer unterschiedlich langen Kerbe von 0,5 mm Breite versehen wurden. Die Kerblänge beträgt 5, 10, 15, 20 und 25 mm.

Qualitative Bewertung an einer Realgeometrie

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde eine reale Kerngeometrie im additiven Fertigungsverfahren auf dem 3-D-Drucksystem VX500 am Lehrstuhl utg hergestellt. Als Geometrie stand hierbei der Serienstand eines 3-Zylinder-Zylinderkopf Wassermantelkerns der BMW AG zur Verfügung. Abbildung 4.26 zeigt das CAD Modell des entsprechenden Realkerns.

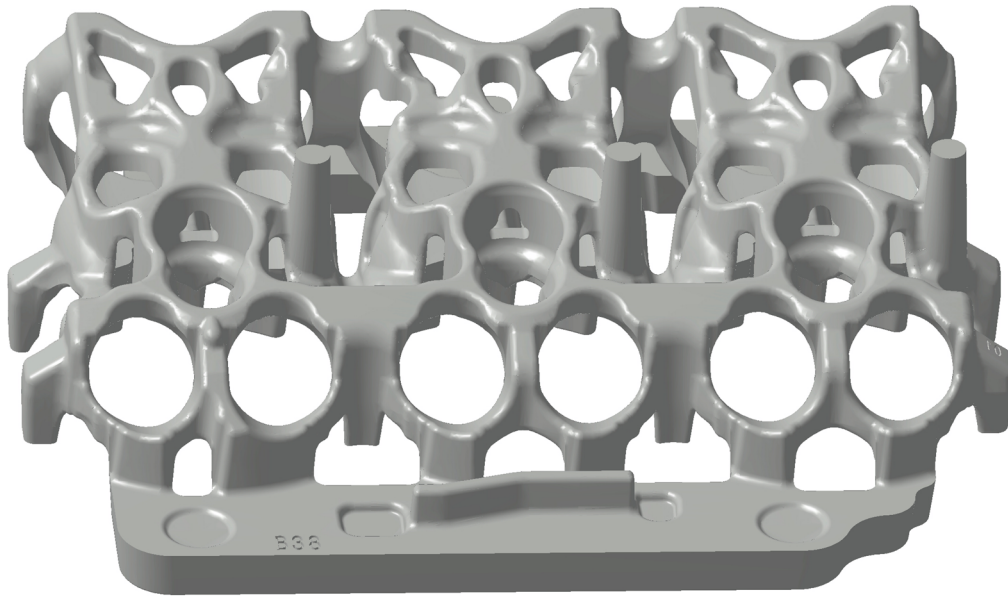


Abbildung 4.26: CAD Modell des 3-Zylinder-Zylinderkopf Wassermantelkerns

Der Job wurde mit einem Fluideintrag von 12% und einem Energieeintrag von 11,205 kJ durchgeführt. Sämtliche weitere Faktoren wurden auf den Referenzeinstellungen belassen. Zusätzlich wurde die Skin-Core Funktion aktiviert und derart parametrisiert, dass der Fluideintrag nur in einer Randschale von vier Millimetern Dicke eingebracht wird.

5 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Analogie zu dem in Kapitel 4.5 vorgestellten Versuchsplan. Es wird bewusst auf eine Interpretation der Ergebnisse verzichtet. Diese erfolgt im Rahmen der Fehlerbetrachtung, empirischen Modellbildung und Diskussion in Abschnitt 6.

5.1 Homogenität und Reproduzierbarkeit

Die Definition eines aussagekräftigen und reproduzierbar einstellbaren Ausgangspunkts ist Grundvoraussetzung für die Durchführung der Faktorvariation. Dieser Ausgangspunkt ist der sog. Referenzjob (vgl. Abschnitt 4.5.2). Die wesentlichen, bei der Definition des Referenzjobs erarbeiteten, Ergebnisse werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

5.1.1 Homogenisierung des Energieeintrags

Die thermische Prozessführung ist ein zentraler Bestandteil der durchgeführten Untersuchungen. In den Abschnitten 4.3.4 und 4.4.2 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. Abbildung 5.1 zeigt den Verlauf der Oberflächentemperaturen an fünf Positionen im Baufeld ohne eine positions- und schichtzahlabhängige Leistungssteuerung.

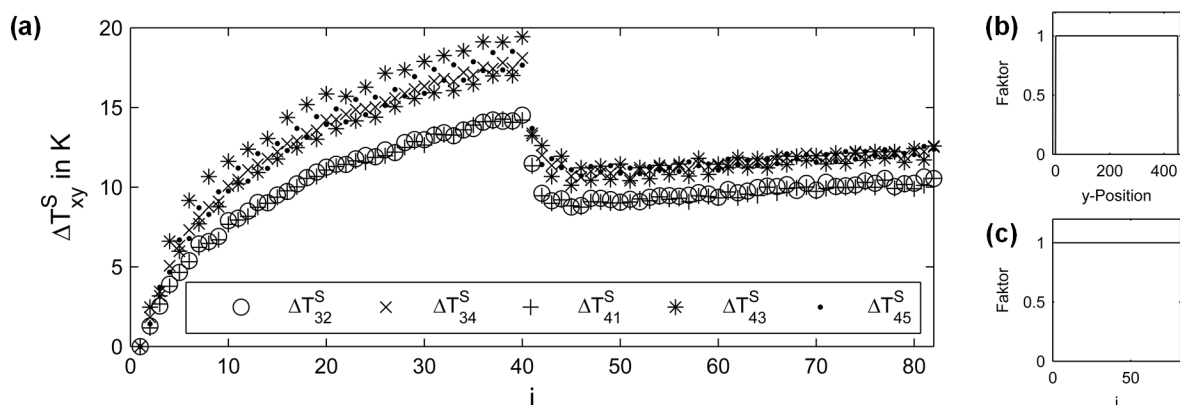


Abbildung 5.1: Erwärmung von Scheibenprüfkörpern an fünf verschiedenen y-Positionen ohne positions- und schichtzahlabhängige Leistungssteuerung (a). Leistungsfaktor über der y-Position (b) und über der Schichtzahl (c).

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 Temperatur-

stieg – zu erkennen an den geteilten Punkteschaaren. Abbildung 5.2 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.

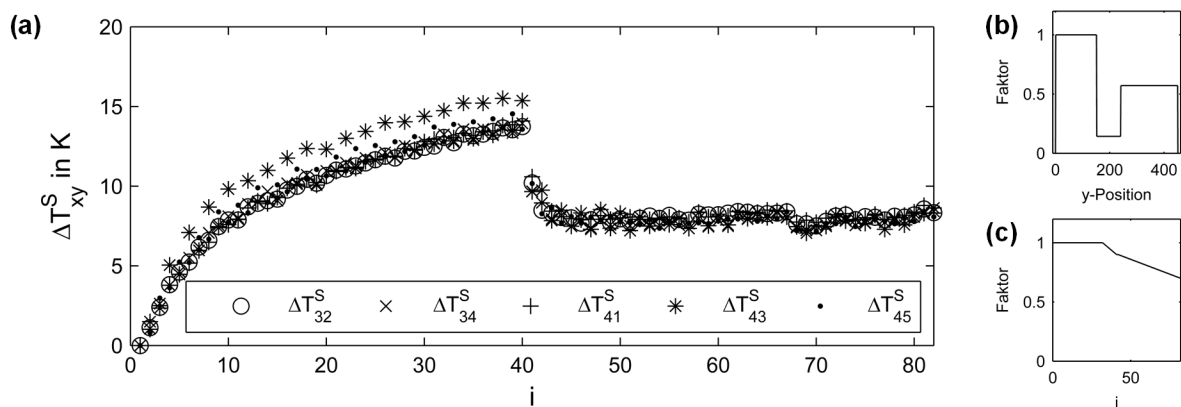


Abbildung 5.2: Erwärmung von Scheibenprüfkörpern an fünf verschiedenen y-Positionen mit positions- und schichtzahlabhängiger Leistungssteuerung (a). Leistungsfaktor über der y-Position (b) und über der Schichtzahl (c).

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 wird 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. Abbildung 5.3 illustriert die Temperaturverteilung für alle Prüfkörper eines Jobs ohne und mit positions- und schichtzahlabhängiger Leistungssteuerung.

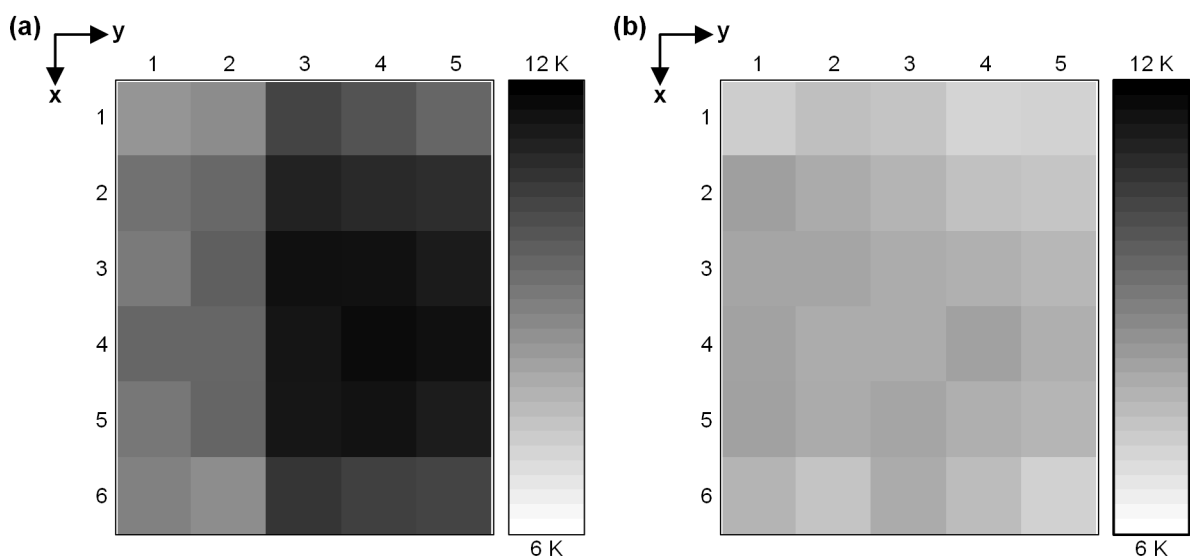


Abbildung 5.3: Mittlere Erwärmung der Prüfkörper ohne (a) und mit (b) Leistungssteuerung

Die bereits in Abbildung 5.1 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 Abbildung 5.4 die Festigkeiten der Scheibenprüfkörper des nicht kompensierten und des kompensierten Jobs gegenüber.

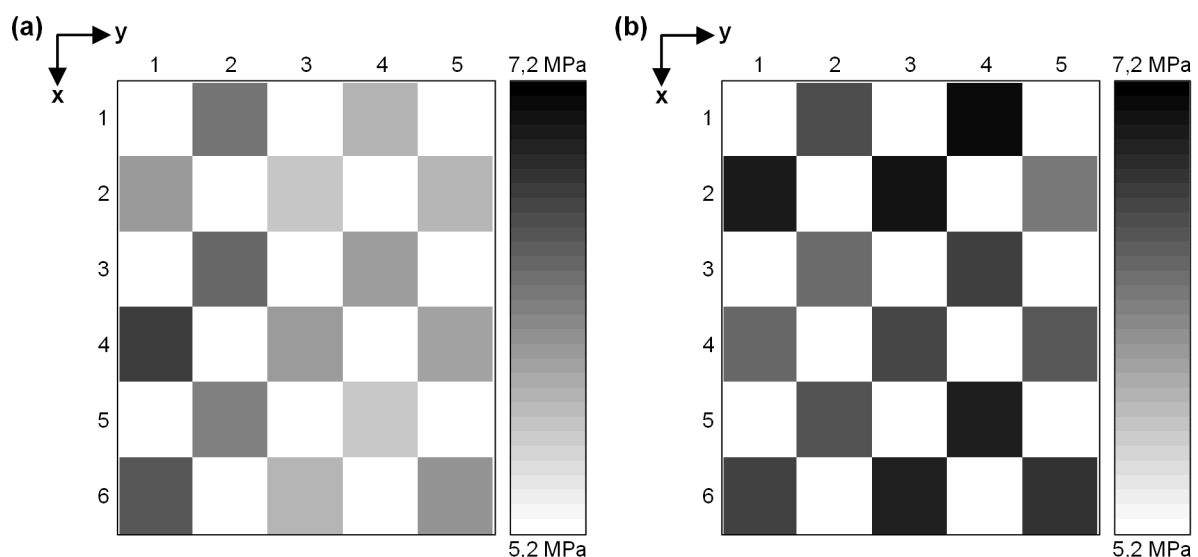


Abbildung 5.4: Festigkeitsverteilung eines nicht-temperaturkompensierten (a) und eines temperaturkompensierten (b) Jobs

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.

5.1.2 Einflüsse der Druckkopfstabilität

Neben der Steuerung des Energieeintrags, ist ein prozesssicherer Fluideintrag von größter Bedeutung für die Herstellung aussagekräftiger Prüfkörper. Maßnahmen zur Sicherstellung eines korrekt arbeitenden Druckkopfs wurden bereits in Abschnitt 4.3.2 erörtert. Wie stark ein instabil arbeitender Druckkopf die Prüfkorpereigenschaften beeinflusst, gibt Abbildung 5.5 wieder. Dargestellt ist die Festigkeitsverteilung von jeweils 15 Scheibenprüfkörpern bei einem instabil und stabil arbeitenden Druckkopf.

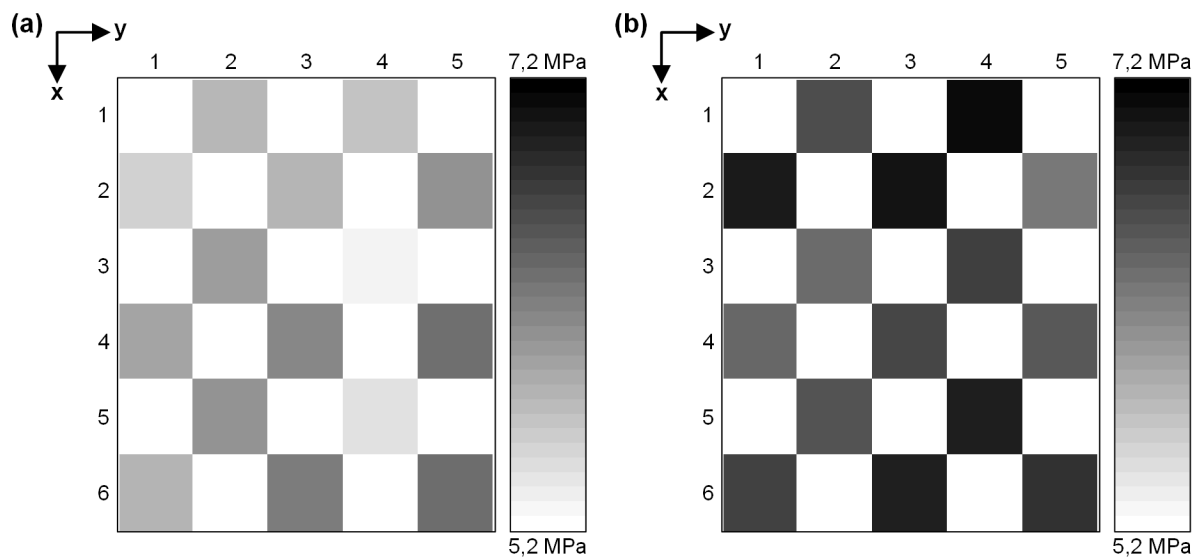


Abbildung 5.5: Festigkeitsverteilung von einem Job mit einem instabil (a) und einem stabil (b) arbeitenden Druckkopf

Im Falle des instabil arbeitenden Druckkopfs kam es durch fehlerhafte Einstellungen der Reinigungswalze zu einer Abnahme der Topfenmassen. Der Ausfall einzelner Düsen während des Druckens der Prüfkörper äußert sich optisch durch ein streifiges Druckbild. Bei der Bestimmung der Festigkeit bedingt die Druckkopfinstabilität 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.

5.1.3 Bestimmung der In-Prozess-Schüttdichte

Die Homogenisierung des Energieeintrags und die Sicherstellung der Druckkopfstabilität stellen die Grundvoraussetzungen zur Herstellung von Prüflingen unter Referenzbedingungen dar. Mit diesen Voraussetzungen konnte die in Abschnitt 4.5.1 beschriebene Bestimmung der In-Prozess-Schüttdichte durchgeführt werden. Abbildung 5.6 stellt die Dichteverteilung über das Baufeld sowie die ermittelte Schüttdichte im Vergleich zur Nenschüttdichte dar.

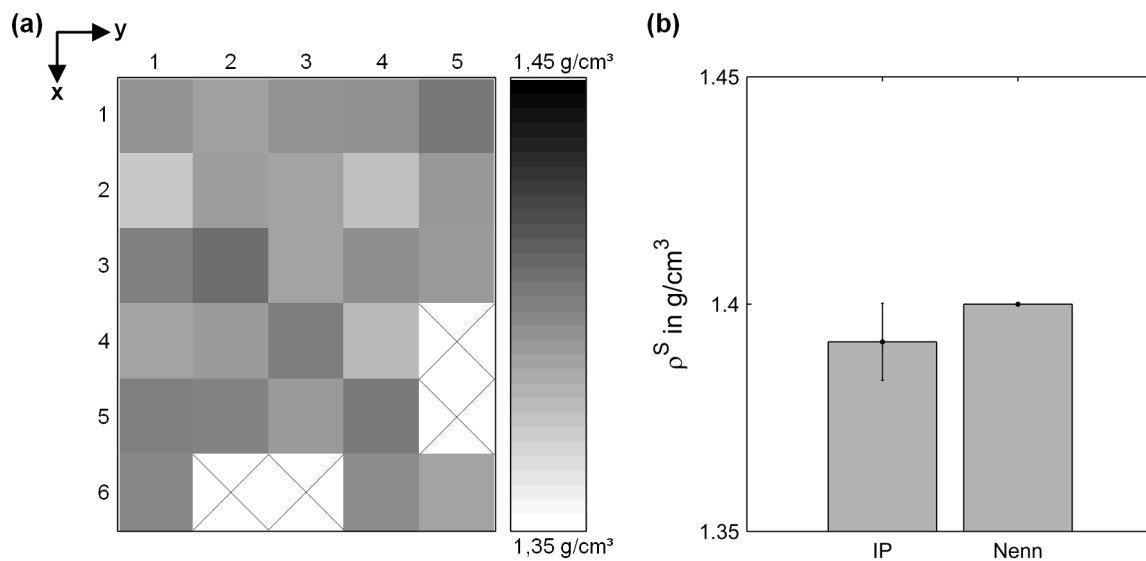


Abbildung 5.6: Verteilung der In-Prozess-Schüttdichte im Bauraum (a) und Gegenüberstellung mit der Nennschüttdichte (b). Proben 45, 55, 62 und 63 wurden beschädigt und daher ausgeschlossen.

Die ermittelte Schüttdichte der Probekörper bewegt sich im Bereich zwischen 1,37 und $1,41 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und ist homogen im Bauraum verteilt. Die Proben 45, 55 sowie 62 und 63 wurden bei der Schüttdichtebestimmung beschädigt und daher ausgeschlossen. Beim Vergleich der In-Prozess- (IP) mit der Nennschüttdichte ist festzuhalten, dass die Nennschüttdichte innerhalb der Standardabweichung des aus 26 Proben bestimmten Mittelwerts von $1,392 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ liegt.

5.1.4 Charakterisierung des Referenzjobs

Quantifizierung der Hauptergebnisse

Mit den zuvor beschriebenen Maßnahmen konnte eine hinreichende Homogenität der Prozess- und Prüfkörpereigenschaften 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 Probentyp (Scheiben- bzw. Ringprüfkörper) und erfolgt in Analogie zu den in Abschnitt 4.4 eingeführten Prozessmodulen. Die Skalierung der Ordinaten orientiert sich an den minimal bzw. maximal gemessenen Werten der jeweiligen Ergebnisse und wird im gesamten Abschnitt 5 konstant gehalten.

Abbildung 5.7 zeigt die Hauptergebnisse der Prozessüberwachung bzw. der Charakterisierung der Scheibenprüfkörper mit jeweiliger Standardabweichung.

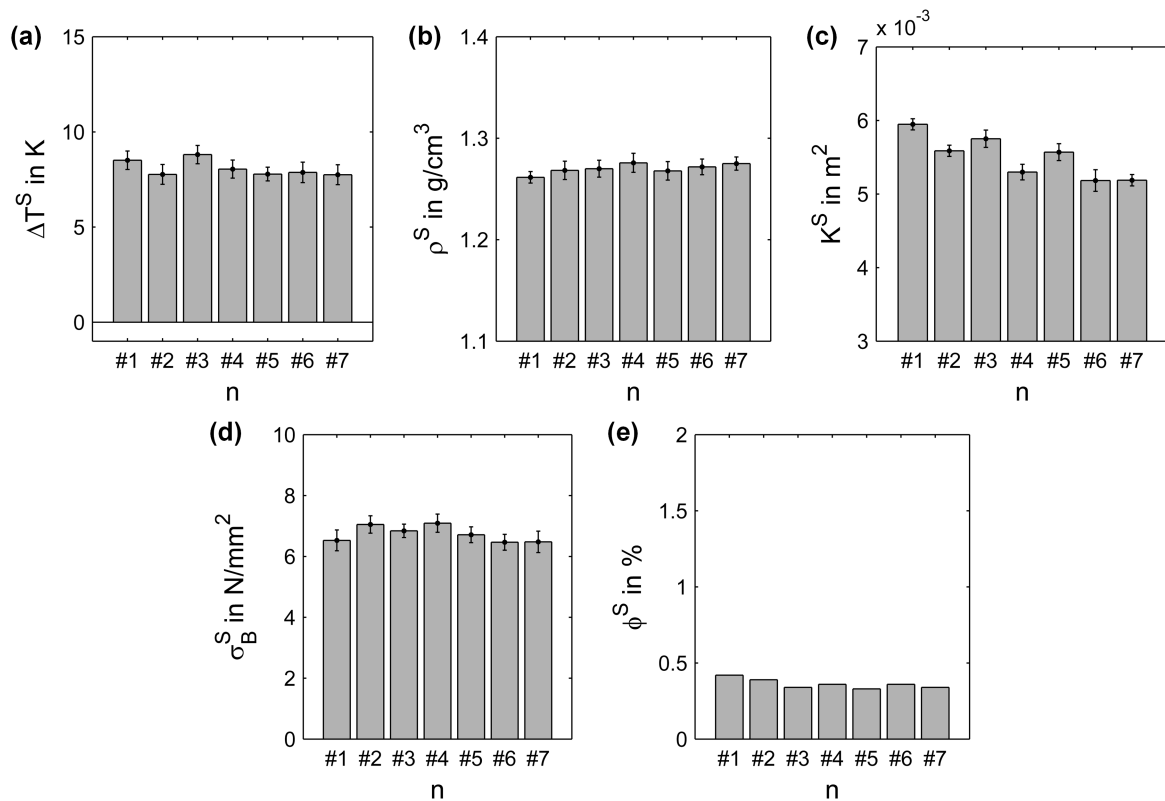


Abbildung 5.7: Hauptergebnisse Prozessstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) der Scheibenprüfkörper für sieben Referenzjobs

Die mittleren Prozessstemperaturen der Scheibenprüfkörper ΔT^S bewegen sich im Bereich um 7,8 K. Die Dichte ρ^S liegt nahezu konstant auf einem Niveau von $1,27 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Größere Schwankungen waren bei der Bestimmung der Permeabilität K^S zu beobachten. Hier liegen die Messwerte für die Referenzjobs zwischen $5,18$ und $5,95 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Die Bruchfestigkeit der Scheibenprüfkörper beträgt zwischen $6,47$ und $7,09 \text{ MPa}$. Die Probenfeuchte ϕ^S liegt in einem Bereich zwischen $0,33\%$ und $0,42\%$.

An den Ringprüfkörpern werden neben der mittleren Prozessstemperatur ΔT^R die Hauptergebnisse Curlneigung C^R , Fluidmigration Δm_F^R und Abrieb Δm_A^R quantifiziert. Abbildung 5.8 zeigt die Ergebnisse der sieben durchgeführten Referenzjobs.

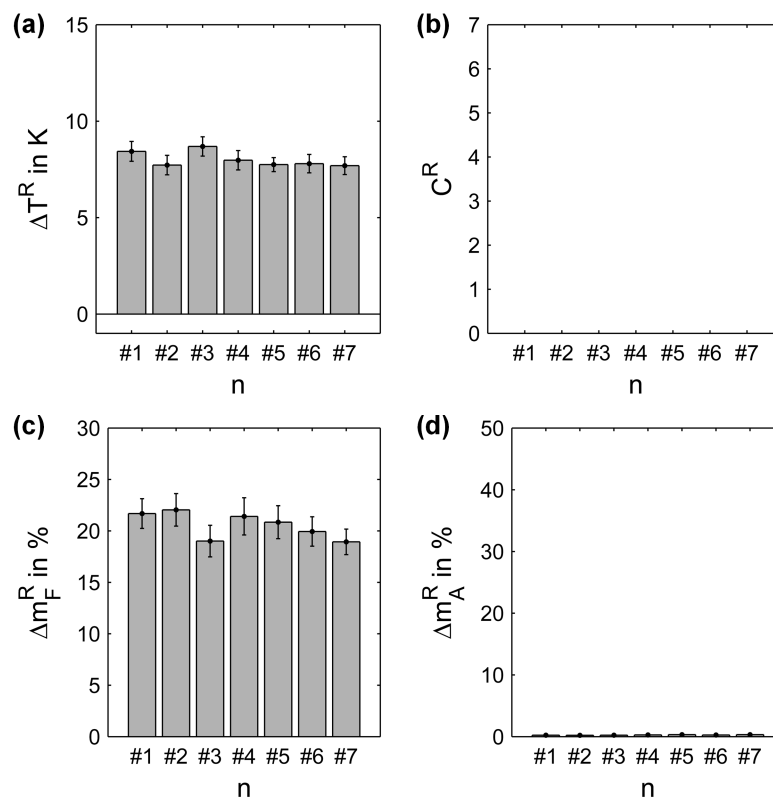


Abbildung 5.8: Hauptergebnisse Prozessparameter (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) der Ringprüfkörper für sieben Referenzjobs

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%.

Qualitative Bewertung

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 den Abbildungen 4.19 bzw. 4.21 dargestellt. Die Prüfkörper weisen mittelmäßig starke Anhaftungen auf und haben eine ausreichend hohe Festigkeit, um problemloses Finishing und Handling zu ermöglichen. Abbildung 5.9 zeigt zwei REM Aufnahmen, die an der Bruchfläche eines Scheibenprüfkörpers aufgenommen wurden.

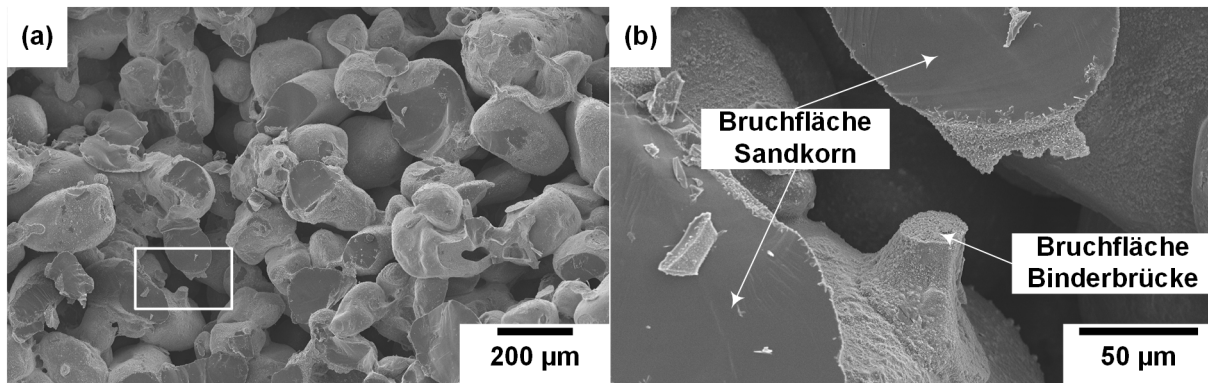


Abbildung 5.9: REM Aufnahmen der Bruchfläche eines mit Referenzeinstellungen hergestellten Scheibenprüfkörpers (a) und Detail einer Sandkornbruchfläche und einer gebrochenen Binderbrücke (b)

Die Übersichtsaufnahme (a) 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.

5.2 Faktorenvariation

Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Ergebnisse der Referenzjobs bilden den Ausgangspunkt für sämtliche Faktorenvariationen. Die folgenden Unterabschnitte legen die gewonnenen Ergebnisse dieser Faktorenvariationen in Analogie zu dem Systemschaubild (vgl. Abb. 4.1) dar. Die Darstellung gliedert sich jeweils in die Quantifizierung der Hauptergebnisse und in die qualitative Bewertung. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird bei der Darstellung der Hauptergebnisse auf Fehlerbalken, die ein Maß für die Homogenität innerhalb des jeweiligen Jobs sind, verzichtet. Die Homogenität der Referenzjobs wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt 5.1 dargelegt. Die Homogenität innerhalb der Jobs der Faktorvariation wird im Rahmen der Fehlerbetrachtung und der daran anschließenden Modellbildung und Diskussion in Abschnitt 6 evaluiert.

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, Energieeintrag und Zeitspanne vor Trocknung.

5.2.1 Binderkonzentration

Quantifizierung der Hauptergebnisse

Als einziger Faktor des Pre-Prozesses wurde der Einfluss der Binderkonzentration auf die Qualitätsmerkmale untersucht. 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. Abbildung 5.10 stellt die Hauptergebnisse dar, die aus den Scheibenprüfkörpern der 17 Jobs dieser Versuchsreihe gewonnenen wurden.

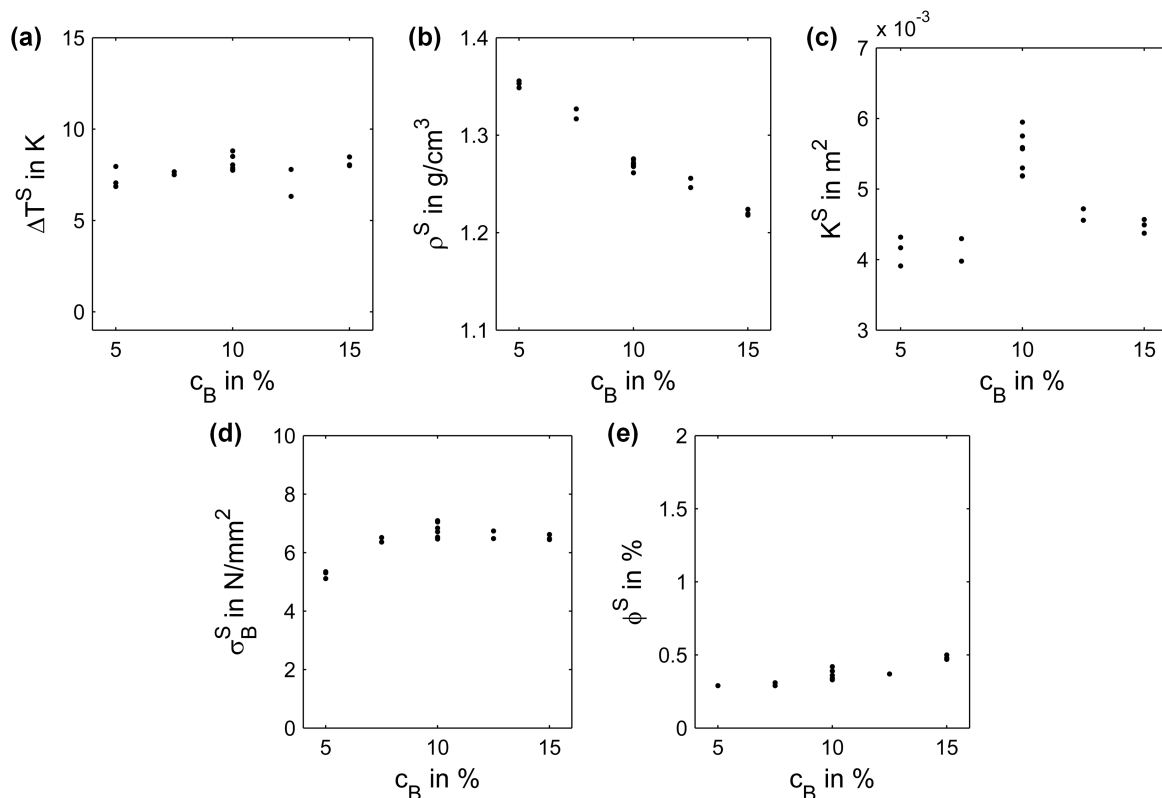


Abbildung 5.10: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit der Binderkonzentration

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 $1,36 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$) 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 $1,22 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. 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 MPa bei einer Binderkonzentration von 5% zunächst einen Anstieg auf maximal 7,09 MPa bei 10% Binderkonzentration. Zwischen 10% und 15% ist ein leichter Abfall auf minimal 6,45 MPa zu verzeichnen. Der Feuchtegehalt steigt von 0,29% bei 5% Binderkonzentration bis auf maximal 0,57% bei 15% Binderkonzentration an.

Abbildung 5.11 stellt die aus den Ringprüfkörpern gewonnenen Hauptergebnisse dar.

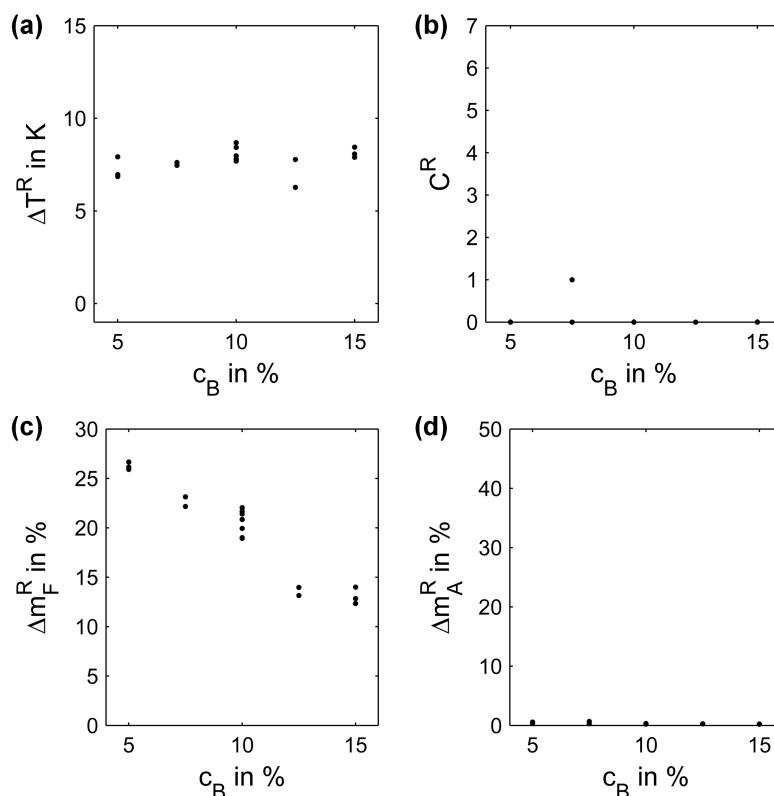


Abbildung 5.11: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit der Binderkonzentration

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 der 255 im Rahmen dieser Versuchsreihe untersuchten Ringprüfkörper beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung für dieses Ereignis wird in Abschnitt 6.2.7 gegeben. Die Fluidmigration zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Binderkonzentration. Bei 5% Bindergehalt erreicht die Fluidmigration maximal Werte von 26,66%. Mit zunehmendem Binderanteil nimmt die Fluidmigration ab und erreicht bei einem Bindergehalt 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.

Qualitative Bewertung

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 4.21(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. Ab-

Abbildung 5.12 zeigt REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenproben, die mit 5% und mit 15% Binderkonzentration hergestellt wurden in jeweils zwei unterschiedlichen Vergrößerungen.

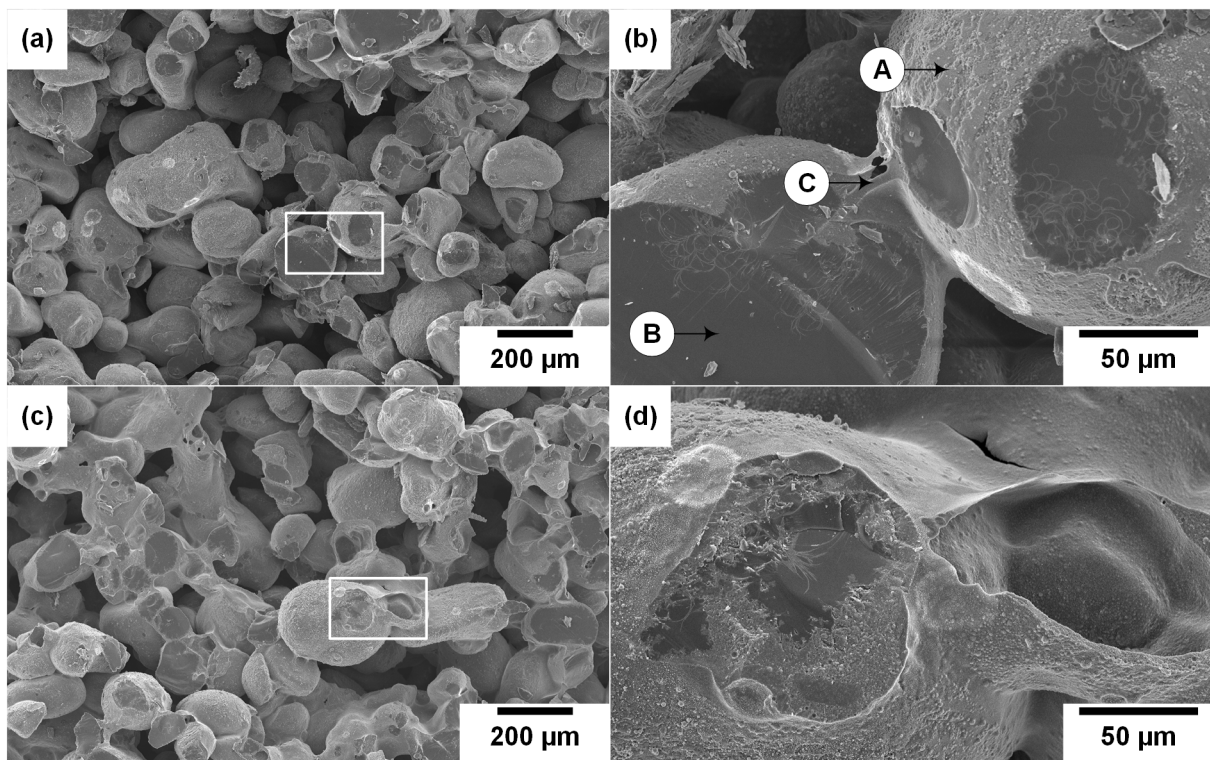


Abbildung 5.12: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern mit 5% (a) und (b) sowie mit 15% (c) und (d) Binderkonzentration. Die Markierungen A, B und C in Ausschnitt (b) geben die Positionen der EDX Analysen wieder.

Die Übersichtsaufnahmen (a) und (c) zeigen ein gemischtes Bruchbild, in dem die Materialtrennung sowohl durch Sandpartikel als auch durch Binderbrücken hindurch stattgefunden hat. Kommt es zum Bruch eines Sandkorns, so äußert sich dies in einer glatten und etwas dunkleren Fläche im Bruchbild. 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. Abbildung 5.13 zeigt die Ergebnisse dieser Analysen.

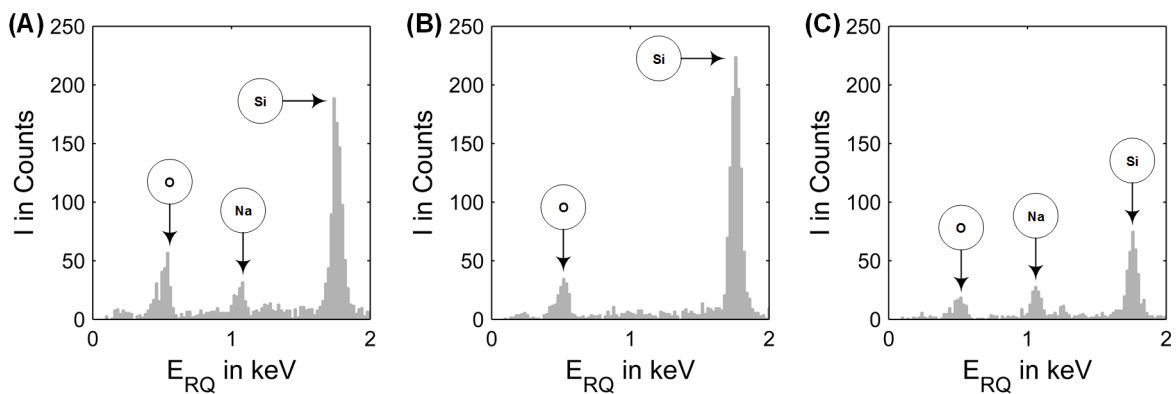


Abbildung 5.13: EDX Analysen der Binderoberfläche auf einem Sandpartikel (A), auf der Bruchfläche eines Sandkorns (B) und auf der Binderbrücke zwischen zwei Sandkörnern (C). Markierung der Elemente nach JOEL (2015).

In den drei Graphen ist jeweils die Signalintensität I in Counts über der Energie der Röntgenquanten E_{RQ} aufgetragen. Sowohl auf der Binderoberfläche auf einem Sandpartikel (A) als auch auf der Binderbrücke (C) können Sauerstoff, Natrium und Silizium detektiert werden. Bei der EDX Analyse der Sandkornbruchfläche (B) kann im Gegensatz hierzu kein Natrium gemessen werden.

5.2.2 Fluideintrag

Quantifizierung der Hauptergebnisse

Im In-Prozess Modul wurden die Faktoren Fluideintrag, Energieeintrag und Zykluszeit variiert. Zunächst werden die Abhängigkeiten der Hauptergebnisse vom Fluideintrag dargelegt. 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. Abbildung 5.14 stellt die Erkenntnisse dar, die aus den Scheibenprüfkörpern gewonnenen wurden.

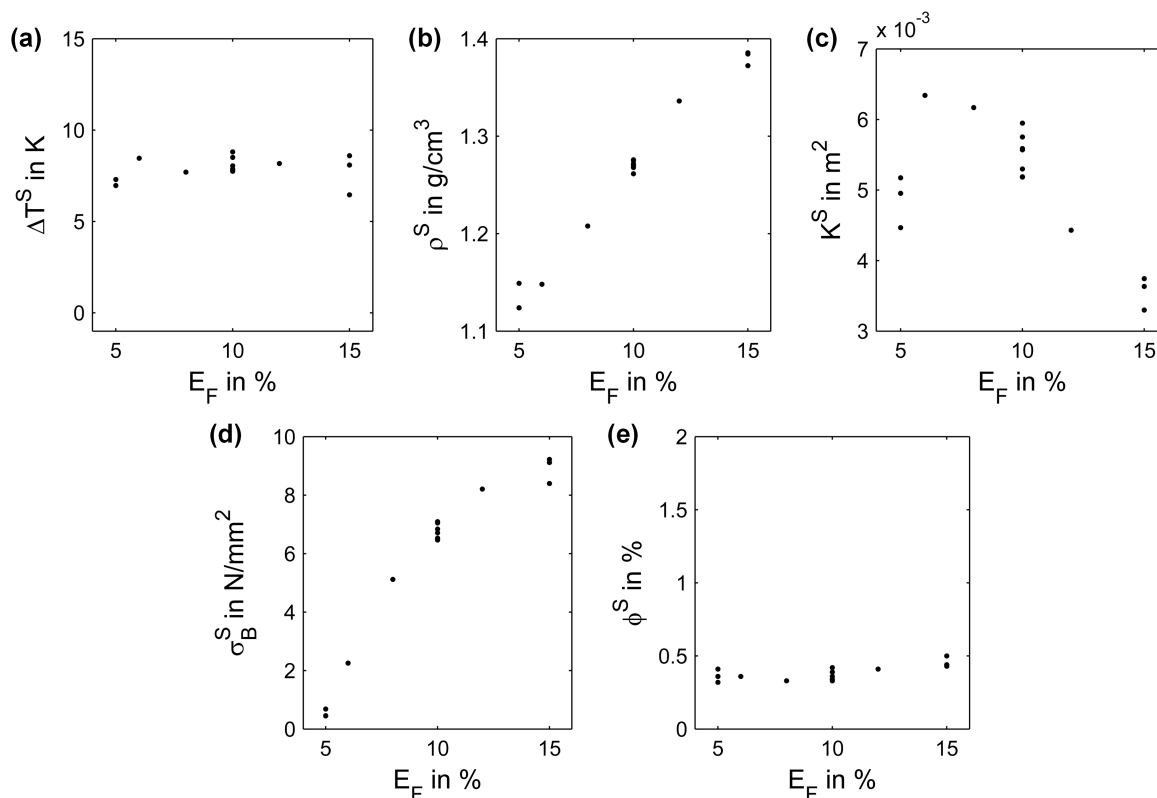


Abbildung 5.14: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit des Fluideintrags

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 $1,12 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ bei einem Fluideintrag von 5% bis auf einen Wert von maximal $1,39 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ bei 15% Fluideintrag. Trotz der erneut starken Streuung der Permeabilitäten ist auch hier eine Abhängigkeit zu erkennen. Die größte Permeabilität ($6,34 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) tritt bei einem Fluideintrag von 6% auf. Bei Erhöhung des Fluideintrags auf 15% nimmt die Permeabilität bis minimal $3,30 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 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.

Abbildung 5.15 stellt die aus den Ringprüfkörpern gewonnenen Hauptergebnisse dar.

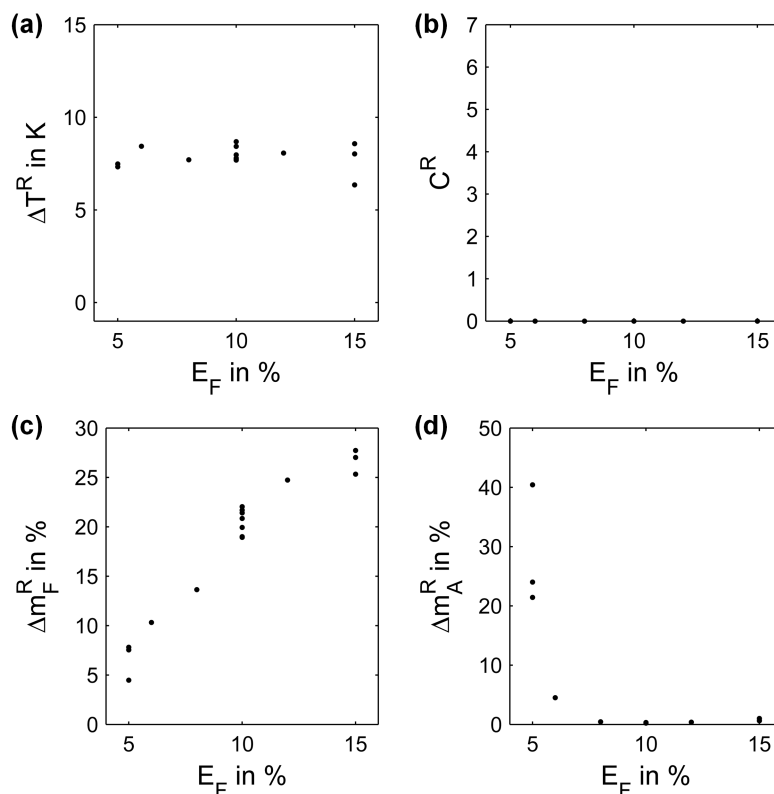


Abbildung 5.15: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit des Fluideintrags

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 Hauptergebnis 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%.

Qualitative Bewertung

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 mechanischen Aufwand gefinished werden. Ab-

bildung 5.16 zeigt REM Aufnahmen der Bruchflächen von den Scheibenproben, die mit 5% und mit 15% Fluideintrag hergestellt wurden.

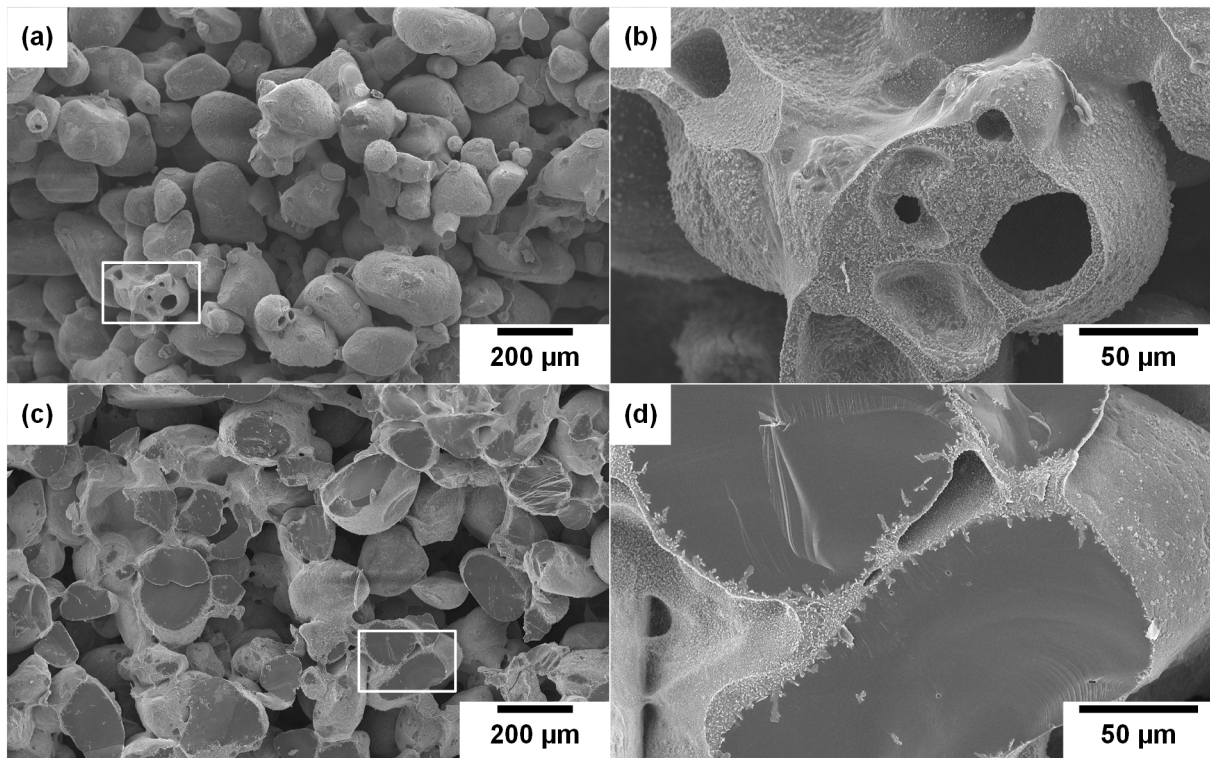


Abbildung 5.16: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern mit 5% (a) und (b) sowie 15% (c) und (d) Fluideintrag

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 (vgl. Abbildung 4.3) 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.

5.2.3 Energieeintrag

Quantifizierung der Hauptergebnisse

Als zweiter Faktor des In-Prozesses wurde eine Variation des Energieeintrags vorgenommen. 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. Abbildung 5.17 illustriert die Ergebnisse, die aus den Scheibenprüfkörpern gewonnen werden konnten.

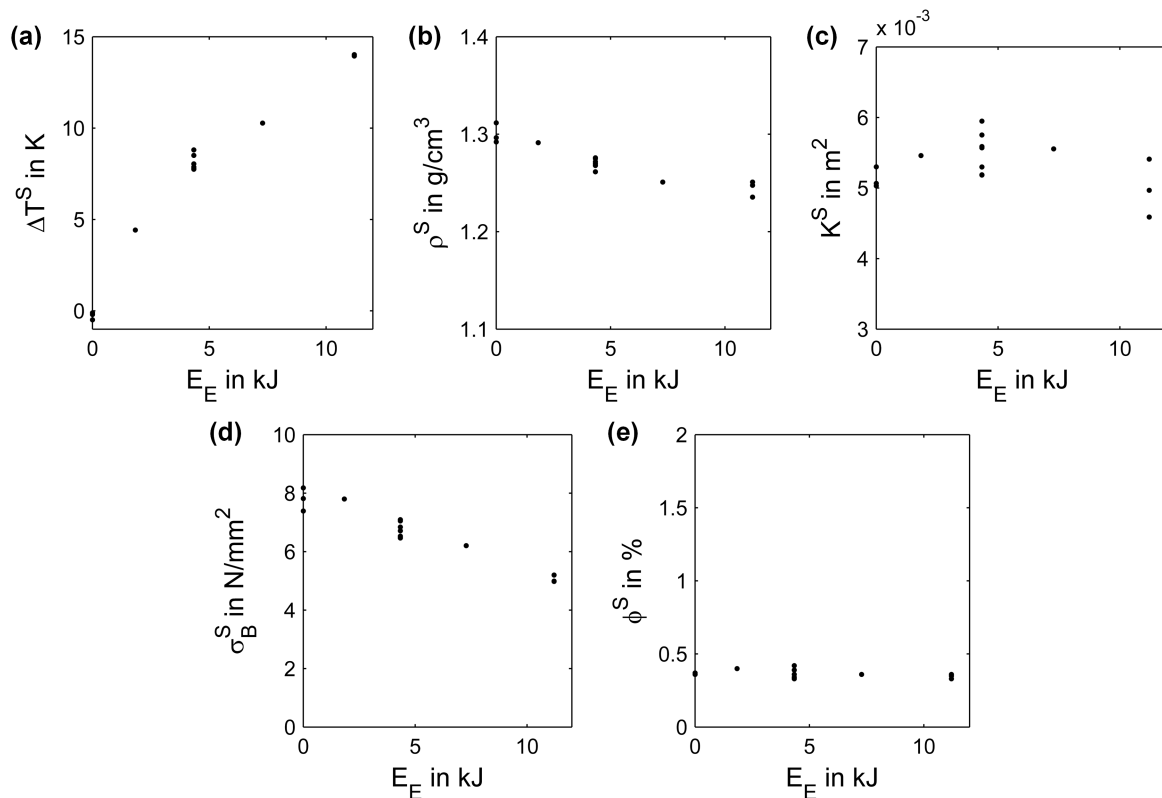


Abbildung 5.17: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit des Energieeintrags

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 $1,31 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Bei maximalem Energieeintrag von 11,205 kJ reduziert sich die Dichte auf minimal $1,24 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. 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 $5,03 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ bzw. $4,59 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. 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%.

Abbildung 5.18 veranschaulicht die Hauptergebnisse der Ringprüfkörper.

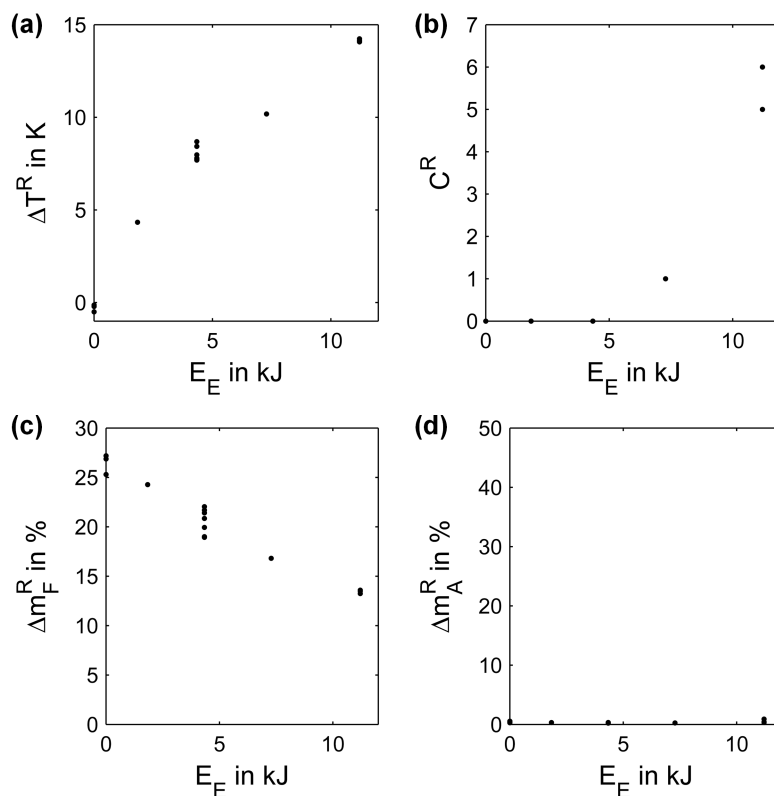


Abbildung 5.18: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit des Energieeintrags

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.

Qualitative Bewertung

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 5.19 zeigt REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenproben, die mit 0 J und 11,205 kJ Energieeintrag hergestellt wurden.

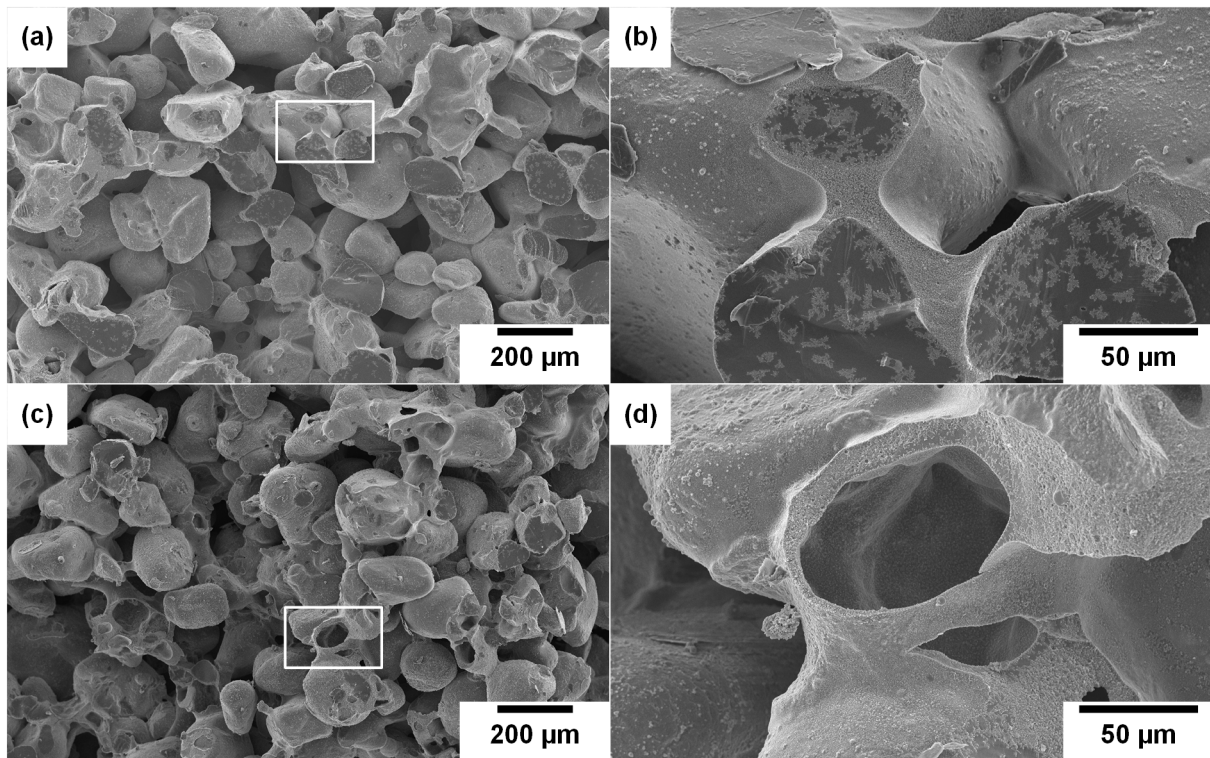


Abbildung 5.19: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern mit 0 J (a) und (b) sowie 11,205 kJ (c) und (d) Energieeintrag

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.

5.2.4 Zykluszeit

Als letzter Faktor des In-Prozesses erfolgte eine Variation der 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. Abbildung 5.20 illustriert die Ergebnisse, die aus den Scheibenprüfkörpern gewonnen werden konnten.

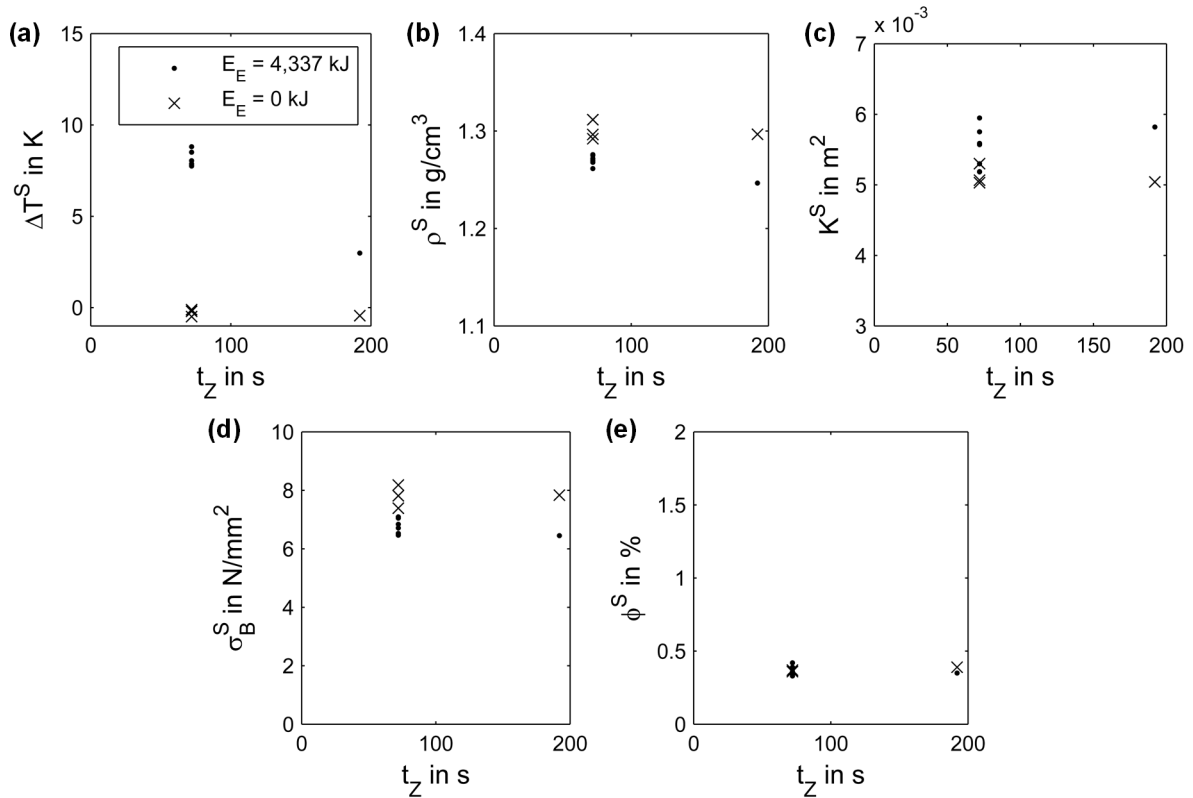


Abbildung 5.20: Darstellung der Hauptergebnisse Prozess Temperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) in Abhängigkeit der Zykluszeit

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 Prozess Temperatur 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 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ 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. Abbildung 5.21 veranschaulicht die Hauptergebnisse der Ringprüfkörper, die im Rahmen dieser Versuchsreihe gewonnen wurden.

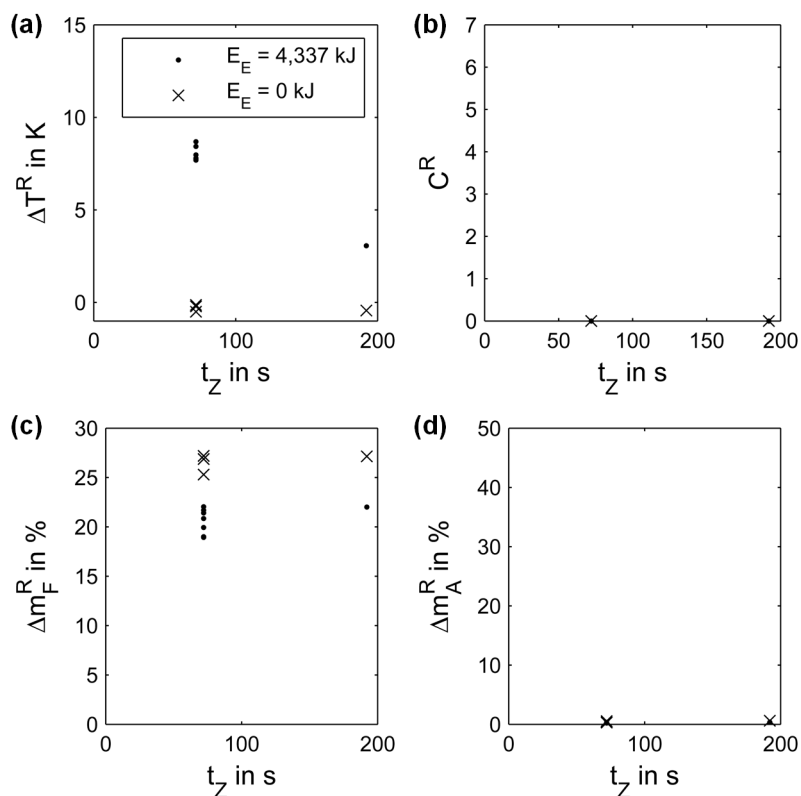


Abbildung 5.21: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) in Abhängigkeit der Zykluszeit

Die Charakterisierung der Ringprüfkörper liefert ähnliche Erkenntnisse wie die der Scheibenprüfkörper. Die Prozesstemperatur zeigt eine eindeutige Abhängigkeit von der Zykluszeit. Eine Zunahme der Zykluszeit führt zu einer Abnahme der Prozesstemperatur 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.

5.2.5 Zeitspanne vor Trocknung

Quantifizierung der Hauptergebnisse

Im abschließenden Prozessmodul, dem *Post-Prozess*, erfolgte eine Variation der Faktoren Zeitspanne vor Trocknung, Trocknungsdauer, Zeitspanne nach Trocknung (Lagerung) und Trocknungstemperatur. Bei der Darstellung der Ergebnisse wird auf die Prozesstemperaturen verzichtet, da diese vor der Faktorvariation im Post-Prozess erfasst werden und daher irrelevant im Rahmen dieser Versuchsreihen sind. Gleiches gilt für das Hauptergebnis der Curlneigung. Curl kann nicht im Post-Prozess auftreten und wird daher im Rahmen dieser Versuchsreihen nicht betrachtet.

Bei Referenzbedingungen werden die Prüfkörper unmittelbar nach dem Drucken dem Trocknungsprozess unterzogen ($n = 7$). Um den Einfluss der Zeitspanne vor der Trocknung bewerten

zu können, wurde diese auf 24 Stunden verlängert ($n = 3$). Abbildung 5.22 illustriert die relevanten Ergebnisse, die aus den Scheiben- und Ringprüfkörpern gewonnen werden konnten.

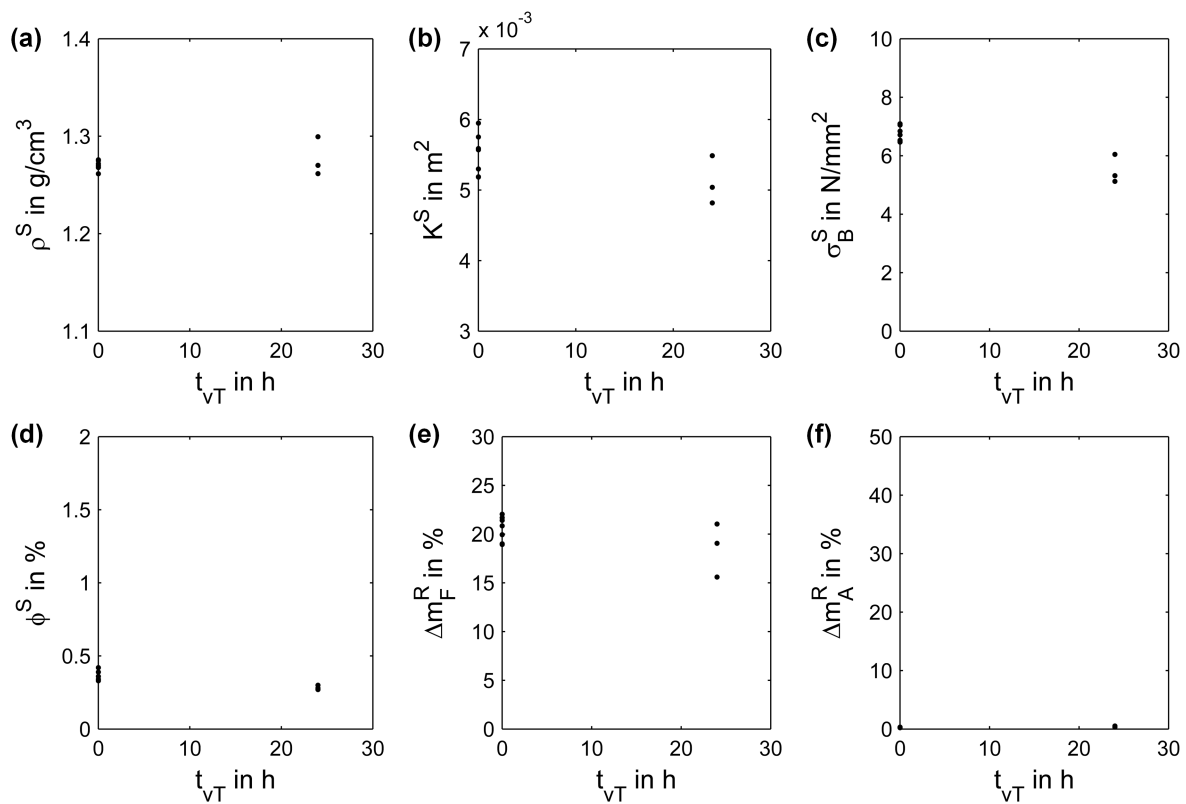


Abbildung 5.22: Darstellung der Hauptergebnisse Dichte (a), Permeabilität (b), Festigkeit (c), Feuchtegehalt (d), Fluidmigration (e) und Abrieb (f) in Abhängigkeit der Zeitspanne vor der Trocknung

Bei einer Verlängerung der Zeitspanne vor der Trocknung auf 24 h, konnte bei der Untersuchung der Dichte keine eindeutige Veränderung im Vergleich mit den Referenzbedingungen festgestellt werden. Die Reproduzierbarkeit nimmt jedoch ab, zu erkennen an der deutlich erhöhten Streuung der Ergebnisgröße. In Bezug auf die Permeabilität kann eine leichte Abnahme auf einen Wert von minimal $4,82 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ erkannt werden. Hier ist ebenfalls eine erhebliche Streuung der Messwerte zu beobachten. Die Festigkeit der Scheibenprüfkörper zeigt einen stärkeren Zusammenhang mit der Wartezeit vor der Trocknung. Dieser äußert sich in einem Abfall der Festigkeiten von maximal 7,09 MPa bei Referenzeinstellungen auf minimal 5,12 MPa bei 24 h. Eine Verringerung der Reproduzierbarkeit ist ebenfalls zu erkennen. Der Feuchtegehalt der Proben zeigt eine leicht abnehmende Tendenz. Hier werden Werte zwischen 0,27% und 0,30% bei 24 h im Vergleich zu Werten von 0,33% und 0,42% bei keiner Wartezeit erreicht. Eine Erhöhung der Zeitspanne vor der Trocknung kann nicht mit einer eindeutigen Veränderung der Fluidmigration in Verbindung gebracht werden. Ähnlich wie bei der Dichte und bei der Permeabilität, ist auch hier eine deutliche Zunahme der Streuung zu beobachten. Der Abrieb der Proben steigt bei verlängerter Wartezeit leicht auf maximal 0,52%.

Qualitative Bewertung

Bezüglich der Optik und der Haptik der Proben, kann kein Unterschied bei unterschiedlichen Wartezeiten vor der Trocknung festgestellt werden. Abbildung 5.23 zeigt REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenproben, die unmittelbar nach der Herstellung getrocknet wurden (Referenzbedingungen) und von Prüfkörpern, die vor der Trocknung 24 h im Sandbett verweilten.

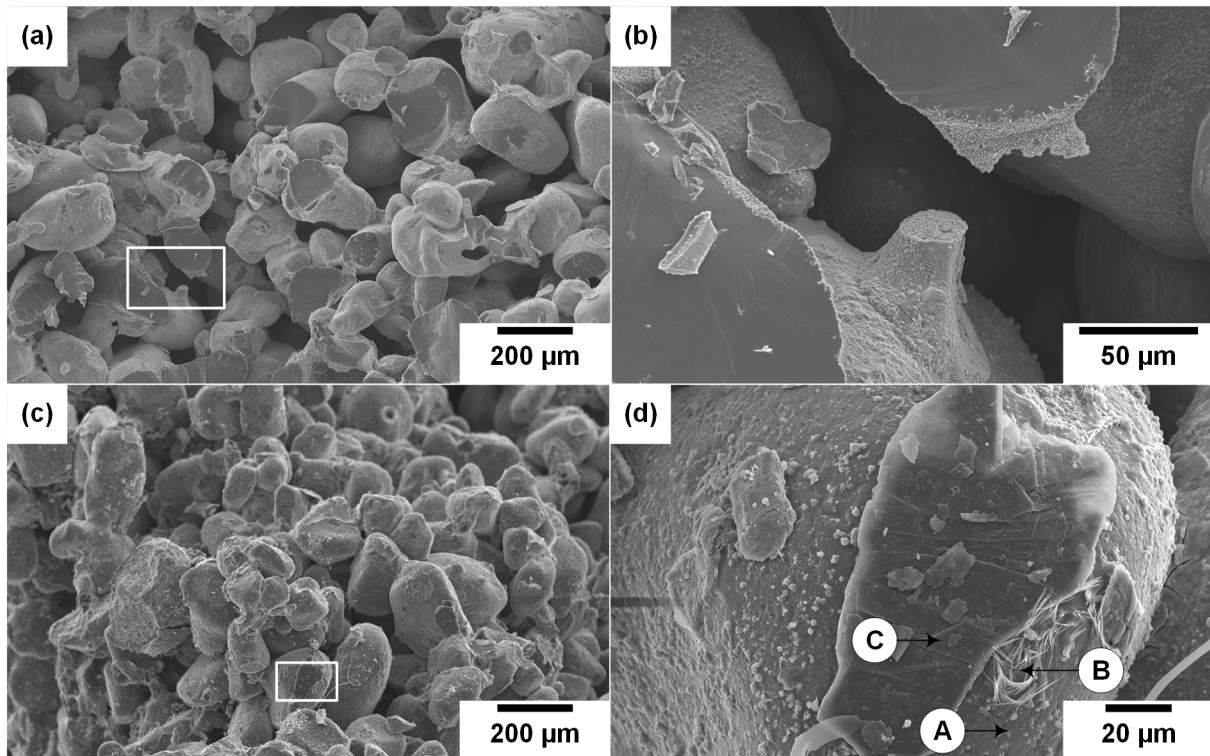


Abbildung 5.23: REM Aufnahmen der Bruchflächen von Scheibenprüfkörpern, die unmittelbar nach der Herstellung getrocknet wurden (a) und (b) sowie von Proben, die 24 h vor der Trocknung gelagert wurden (c) und (d)

Im Vergleich mit den Referenzbedingungen zeigt die Übersichtsaufnahme der Probe, die vor der Trocknung im Sandbett gelagert wurde (c), eine rauere und zerklüfteter Oberfläche. Es sind keine gebrochenen Sandpartikel zu erkennen. Bei höherer Vergrößerung ist eine nadelartige Struktur (B) auf der Binderoberfläche festzustellen. Diese konnte ausschließlich bei Proben, die vor der Trocknung gelagert wurden, erkannt werden. Zur qualitativen Bestimmung der chemischen Elemente in den mit A, B und C gekennzeichneten Bereichen der Detailaufnahme (d), wurde eine EDX Analyse durchgeführt. Die Messdaten (vgl. Anhang Abbildung 3) zeigen im Bereich A, in dem keine Nadeln auftreten, eine vergleichbare Zusammensetzung wie die EDX Analyse des entsprechenden Bereichs der Referenzprobe (vgl. Abbildung 5.13). Hier lassen sich die Elemente Silizium, Sauerstoff und Natrium nachweisen. Der Bereich B zeigt eine erhöhte Sauerstoff- und Natriumkonzentration sowie die Anwesenheit von Kohlenstoff. Im Bereich C ist Kohlenstoff das dominierende Element.

5.2.6 Trocknungsdauer

Die Variation der Trocknungsdauer erfolgte ausgehend von den Referenzjobs mit 1 h ($n = 7$). Hier wurden Versuche mit einer Trocknungsdauer von 15 Minuten ($n = 3$) und 4 Stunden ($n = 3$) durchgeführt. Abbildung 5.24 stellt die gewonnenen Ergebnisse dar.

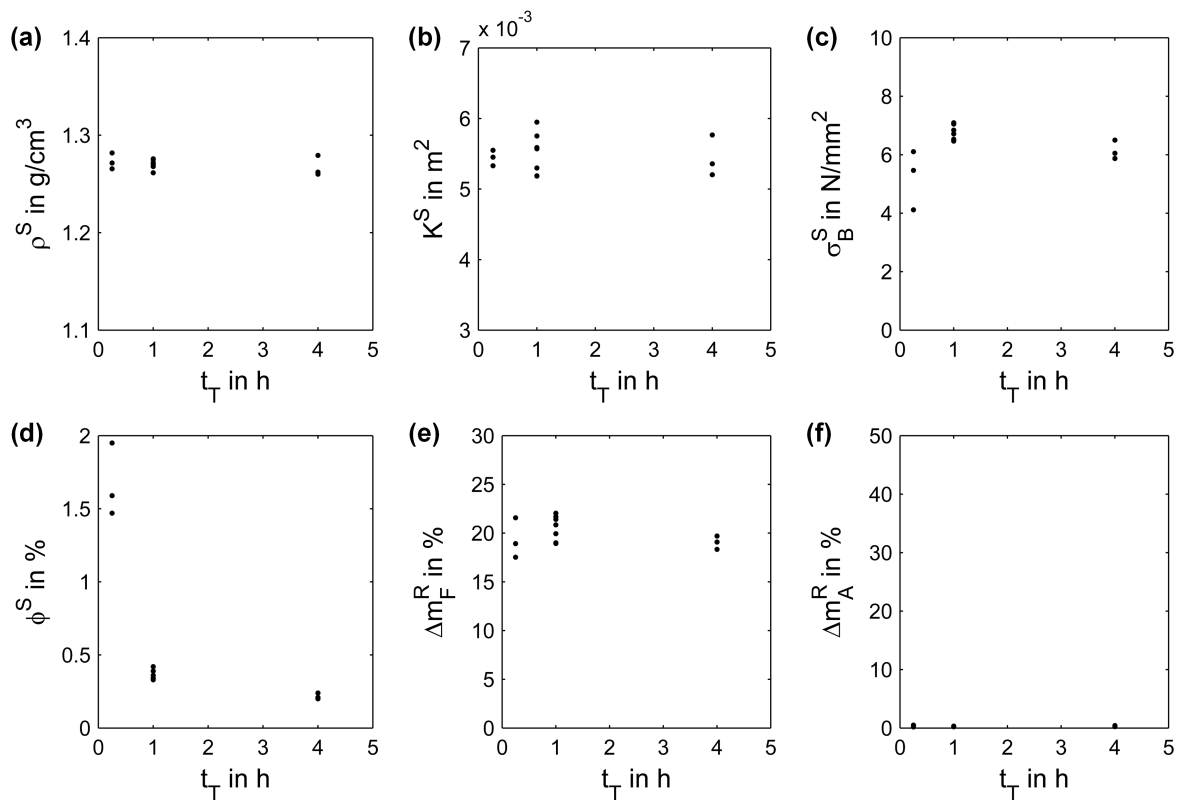


Abbildung 5.24: Darstellung der Hauptergebnisse Dichte (a), Permeabilität (b), Festigkeit (c), Feuchtegehalt (d), Fluidmigration (e) und Abrieb (f) in Abhängigkeit der Trocknungsdauer

Die Dichte der Proben zeigt keine eindeutige Abhängigkeit von der Trocknungsdauer. Sie bewegt sich zwischen 1,26 und 1,28 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Bei der Bestimmung der Permeabilität konnte ebenfalls keine Abhängigkeit von der Dauer der Trocknung festgestellt werden. Alle gemessenen Werte bewegen sich innerhalb der Schwankungen der Referenzjobs. Bei der Bestimmung der Festigkeit lässt sich ein Abfall der Festigkeit sowohl zu kürzeren als auch zu längeren Trocknungszeiten hin feststellen. Erfolgt die Trocknung lediglich für 15 Minuten, so kommt es zu breit gestreuten Festigkeiten zwischen 4,12 und 6,10 MPa. Bei einer Trocknungsdauer von 4 Stunden verlieren die Proben leicht an Festigkeit und weisen Werte von minimal 5,87 MPa auf. Ein deutlicher Einfluss der Trocknungsdauer kann bei Betrachtung des Feuchtegehalts festgehalten werden. Nach einer viertelstündigen Trocknung weisen die Proben eine hohe Restfeuchte von maximal 1,95% auf. Der Referenzwert liegt hier zwischen 0,33% und 0,42%. Eine Trocknungsdauer von vier Stunden bewirkt eine weitere Reduktion auf minimal 0,20%. Die Untersuchung der Fluidmigration in Abhängigkeit der Trocknungsdauer zeigt keinen eindeutigen Zusammenhang. Proben die 15 Minuten getrocknet wurden, weisen erhöhte Streuung auf. In Bezug auf den Abrieb kann eine leichte Zunahme sowohl bei verkürzter Trocknung (maximal 0,51%) als auch bei verlängerter Trocknung (maximal 0,43%) festgehalten werden.

5.2.7 Zeitspanne nach Trocknung (Lagerung)

In den Referenzversuchen erfolgt die Charakterisierung der Qualitätsmerkmale unmittelbar im Anschluss an die Trocknung. Um einen Einfluss einer längeren Lagerung der Prüflinge auf die Qualitätsmerkmale quantifizieren zu können, wurden Versuchsreihen durchgeführt, bei denen die Prüflinge vor ihrer Charakterisierung für 24 Stunden ($n = 3$) und eine Woche ($n = 3$) im Sandlabor gelagert wurden. In Abbildung 5.25 werden die gewonnenen Ergebnisse veranschaulicht.

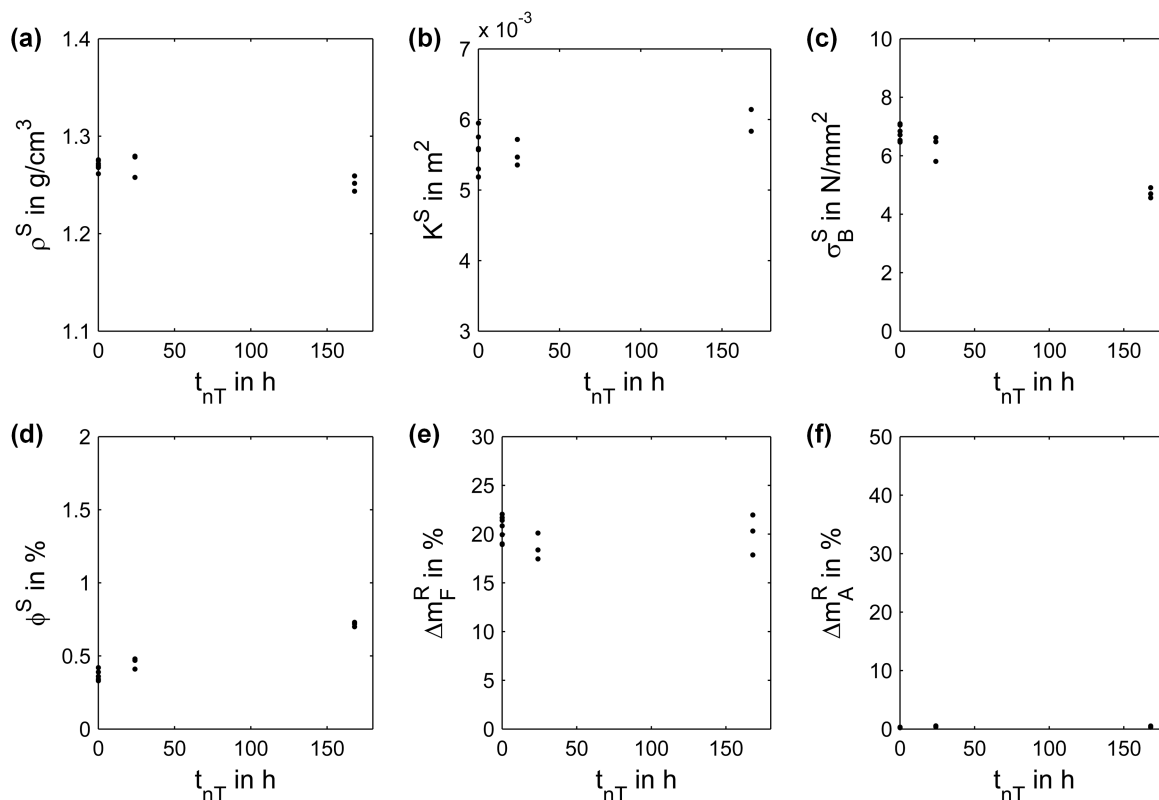


Abbildung 5.25: Darstellung der Hauptergebnisse Dichte (a), Permeabilität (b), Festigkeit (c), Feuchtegehalt (d), Fluidmigration (e) und Abrieb (f) in Abhängigkeit der Zeitspanne nach der Trocknung

Die Dichte der Prüfkörper zeigt bei einer Lagerung von 24 Stunden keine eindeutige Veränderung. Die Streuung der gemessenen Werte nimmt zu. Bei einer Lagerung von einer Woche ist ebenfalls eine größere Streuung zu beobachten, wobei die Dichte leicht abnimmt. Minimal wird hier ein Wert von $1,24 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ erreicht. Die Untersuchung der Permeabilität zeigt einen ansteigenden Trend mit zunehmender Lagerdauer. Bei einer Lagerung von einer Woche konnten Werte von maximal $6,14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ gemessen werden. Ein eindeutiger Zusammenhang konnte bei der Bestimmung der Festigkeit herausgestellt werden. Mit zunehmender Lagerungsdauer fällt die Festigkeit auf einen Wert von minimal 4,56 MPa ab. Der Feuchtegehalt der Prüfkörper offenbart ebenso eine deutliche Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen Trocknung und Charakterisierung. Unmittelbar nach der Trocknung weisen die Proben Feuchtegehalte zwischen 0,33% und 0,42% auf. Mit zunehmender Lagerzeit nimmt der Feuchtegehalt zu. Maximal erreicht er nach einer Woche Lagerung einen Wert von 0,73%. Bezüglich der Fluidmigration kann zwischen minimaler und maximaler Lagerdauer kein eindeutiger Unterschied festgestellt

werden. Proben, die eine Woche gelagert wurden, weisen bei der Bestimmung der Fluidmigration erhöhte Streuung auf. Bei einer Lagerung von 24 Stunden konnte der Minimalwert der Fluidmigration von 17,46% festgestellt werden. Mit zunehmender Lagerzeit nimmt der Abrieb der Prüfkörper leicht zu. Maximal wird ein Wert von 0,54% erreicht.

5.2.8 Trocknungstemperatur

Während der Trocknung der Prüfkörper in der Klimakammer können unterschiedliche Temperaturen gewählt werden. Um den Einfluss einer erhöhten Trocknungstemperatur feststellen zu können, wurde neben der Referenztemperatur von 120°C (n = 7) eine Versuchsreihe mit einer Trocknung bei 180°C (n = 3) durchgeführt. Abbildung 5.26 zeigt die relevanten Ergebnisse, die aus den Scheiben- und Ringprüfkörpern gewonnen werden konnten.

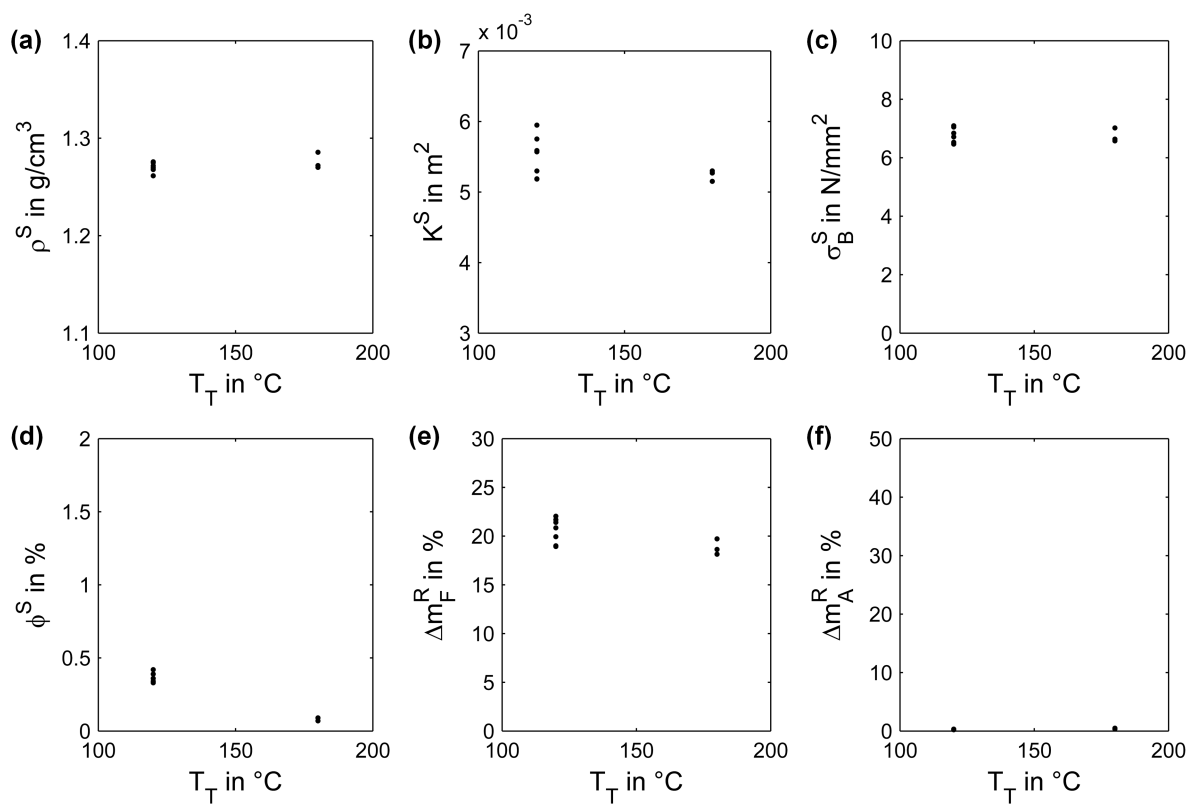


Abbildung 5.26: Darstellung der Hauptergebnisse Dichte (a), Permeabilität (b), Festigkeit (c), Feuchtegehalt (d), Fluidmigration (e) und Abrieb (f) in Abhängigkeit der Trocknungstemperatur

Die Qualitätsmerkmale Dichte, Permeabilität und Festigkeit zeigen im Rahmen dieser Untersuchung keine eindeutige Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur. Ähnlich verhält es sich auch bei der Quantifizierung der Fluidmigration und des Abriebs. Lediglich die Feuchtigkeit der Prüfkörper zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur. Hier kommt es zu einer Verringerung des Feuchtegehalts der Proben auf minimal 0,07%.

5.3 Ergänzende Versuchsreihen

Der vorliegende Abschnitt stellt die Ergebnisse ergänzender Versuchsreihen vor. Diese Ergebnisse dienen dem weiterführendem Verständnis des Systems sowie der Beschreibung von Prozess- und Bauteilbesonderheiten. Die Ergebnisse in diesem Abschnitt werden vergleichend zu den Hauptergebnissen eines der sieben Referenzjobs aus Abschnitt 5.1 (Referenzjob #5) dargestellt.

5.3.1 Einfluss der y-Druckrichtung

Der Arbeitszyklus der Anlage während einer Schicht sieht vor, dass das Beschichten von links nach rechts, das Bedrucken von rechts nach links und das Belichten von links nach rechts erfolgen. Dies führt zu einer unterschiedlichen Zeitspanne zwischen Beschichten und Bedrucken, in Abhängigkeit der y-Position einer Probe im Baufeld. Liegt die Probe links (y-Reihe 1) im Baufeld, so wird sie als erstes beschichtet und als letztes bedruckt. Die zeitliche Differenz beträgt 36 Sekunden. Eine rechts liegende Probe (y-Reihe 5) wird hingegen als letztes beschichtet und als erstes bedruckt. Das Zeitintervall liegt bei 10 Sekunden. Bei der Durchführung der Faktorenvariation konnte beobachtet werden, dass eine Vielzahl von Versuchen einen leichten Anstieg der Fluidmigration mit zunehmender y-Position im Baufeld zeigen. Um einen Zusammenhang zur y-Druckrichtung herstellen zu können, wurde ein Standardjob gedruckt, bei dem die y-Druckrichtung umgekehrt wurde. Für diesen Versuch wurde der IR-Strahler deaktiviert, um eine Überlagerung von thermischen Effekten ausschließen zu können. Abbildung 5.27 zeigt die Fluidmigration in Abhängigkeit der y-Position der Ringprüfkörper im Baufeld für einen Referenzjob, für einen Job bei inaktivem IR-Strahler und für einen Job bei inaktivem IR-Strahler und bei umgekehrter y-Druckrichtung. Jeder Balken entspricht dem Mittelwert der drei Ringprüfkörper einer y-Reihe mit ihren Standardabweichungen.

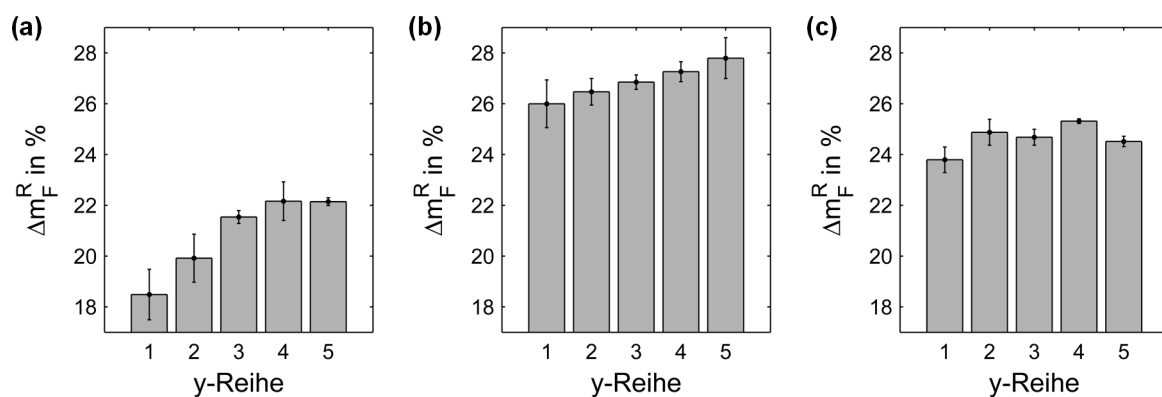


Abbildung 5.27: Auftragung der Fluidmigration über die y-Reihe innerhalb des Baufelds für den Referenzjob (a), einen Job ohne Einsatz des IR-Strahlers und einen Job mit entgegengesetzter y-Druckrichtung

Sowohl der Referenzjob (a) als auch der Job mit deaktiviertem IR-Strahler (b) zeigen eine Zunahme der Fluidmigration von der ersten zur fünften y-Reihe hin. Diese Charakteristik kann bei dem Job mit inaktivem IR-Strahler und umgekehrter Druckrichtung (c) nicht beobachtet werden. Hier liegen alle Reihen auf einem ähnlich hohen Niveau.

5.3.2 Untersuchung der Anisotropie in z-Richtung

Die Darstellung der Anisotropie der Hauptergebnisse in z-Richtung erfolgt durch den Vergleich des Referenzjobs mit zwei Jobs, in denen die Scheiben- und Ringprüfkörper stehend gebaut wurden. Hier wurden die Prüfkörper jeweils um 90° bezüglich der x- bzw. y-Achse des Bau-raums gedreht. Abbildung 5.28 zeigt die aus den Scheibenprüfkörpern gewonnenen Ergebnisse.

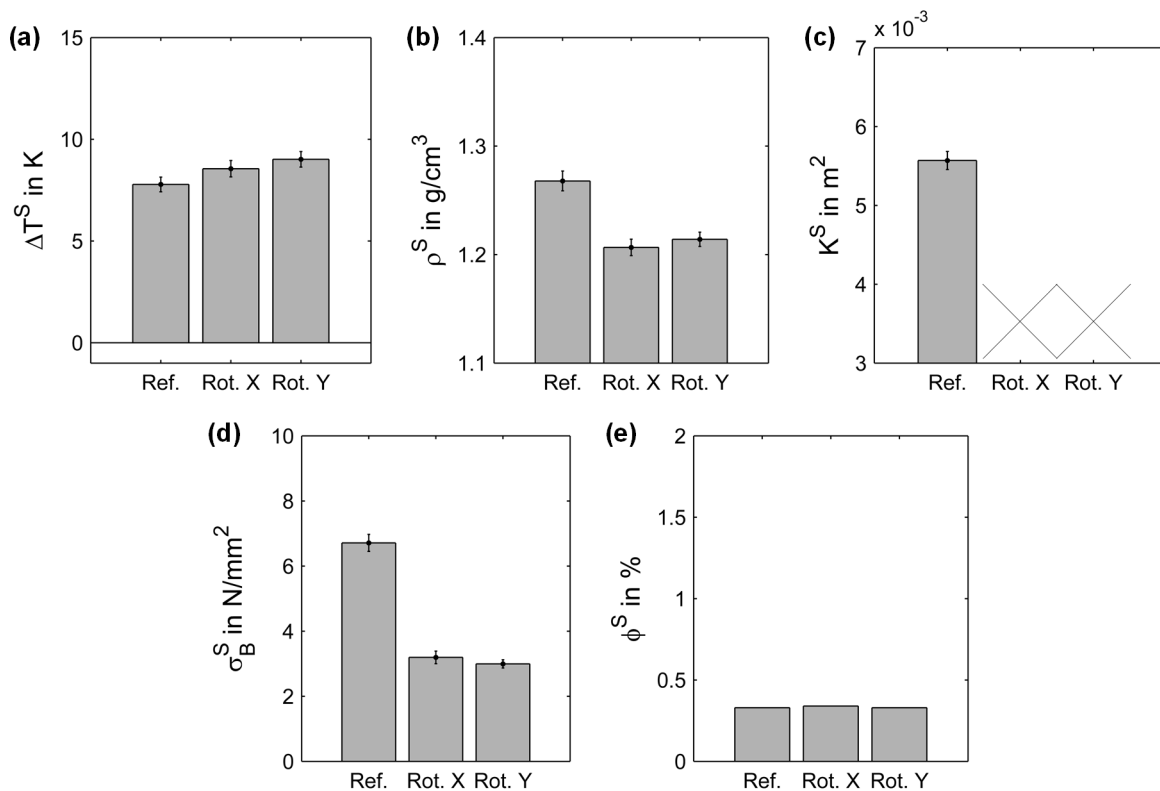


Abbildung 5.28: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Dichte (b), Permeabilität (c), Festigkeit (d) und Feuchtegehalt (e) der Referenzproben sowie der um die x- bzw. y-Achse des Bau-raums rotierten Prüfkörper. Aufgrund fehlerhafter Messtechnik konnten bei rotierten Prüfkörpern keine Permeabilitätswerte (c) erfasst werden.

Die Prozesstemperaturen der rotierten Jobs liegen mit 8,6 bzw. 9,0 K geringfügig oberhalb derer des Referenzjobs (7,8 K). Die Dichte der stehend gebauten Prüfkörper liegt mit minimal $1,21 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ deutlich unterhalb der Referenzdichte von $1,27 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Aufgrund einer fehlerhaften Kalibrierung des Gasdurchlässigkeitsprüfgeräts konnten bei dieser Messreihe keine Permeabilitätswerte erfasst werden. Die Festigkeit zeigt eine deutliche Anisotropie in z-Richtung. Mit Werten von 3,19 bzw. 2,99 MPa können die Scheibenprüfkörper weniger als 50% der Spannung der Referenzproben ertragen bevor sie brechen. Bei dem Feuchtegehalt der Scheibenprüfkörper konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Abbildung 5.29 visualisiert die aus den Ringprüfkörpern gewonnenen Ergebnisse.

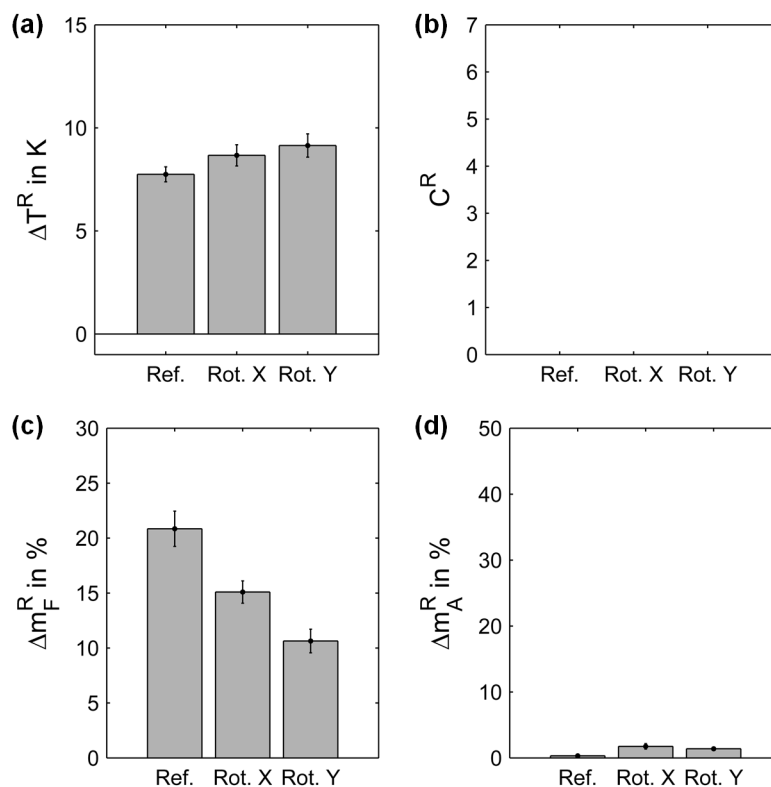


Abbildung 5.29: Darstellung der Hauptergebnisse Prozesstemperatur (a), Curlneigung (b), Fluidmigration (c) und Abrieb (d) der Referenzproben sowie der um die x- bzw. y-Achse des Bau- raums rotierten Prüfkörper

Die Prozesstemperaturen der Ringprüfkörper zeigen ein sehr ähnliches Verhalten wie die der Scheibenprüfkörper. Bei keiner der Proben dieser Versuchsreihe kam es zu Curl. Eine ausgeprägte Anisotropie zeigt sich bei der Bestimmung der Fluidmigration. Der Referenzwert liegt bei 20,85%. Bei einer Rotation der Prüflinge um die x-Achse reduziert sich die Fluidmigration auf 15,09%. Eine Rotation um die y-Achse resultiert in einer weiteren Abnahme auf einen Wert von 10,64%. Die stehend gebauten Prüfkörper zeigen einen deutlich erhöhten Abrieb. Im Vergleich zu der Referenz von 0,32% wurden hier Werte von 1,76% und 1,40% ermittelt.

5.3.3 Detektion von prozessbedingten Schwachstellen

Die Lasteinleitung beim Scheibentest induziert in der Probe eine äquibiaxiale Zugspannung im Mittelpunkt der Auflagerseite. Diese Art der Lasteinleitung ermöglicht es Ungängen innerhalb von Prüflingen zu detektieren. Dazu wurden zwei Jobs mit jeweils 30 Scheibenprüfkörpern unter Referenzeinstellungen hergestellt. Diese Prüfkörper wurden mit denen in Abschnitt 4.5.3 beschriebenen Ungängen versehen. Abbildung 5.30 zeigt die Ergebnisse des ersten Jobtyps. Dabei wurde sowohl die Größe der Ungänge als auch der Abstand zum Probenmittelpunkt variiert. Die Datenpunkte geben den Mittelwert aus fünf gleichartigen Proben einer x-Reihe mit ihren Standardabweichungen wieder.

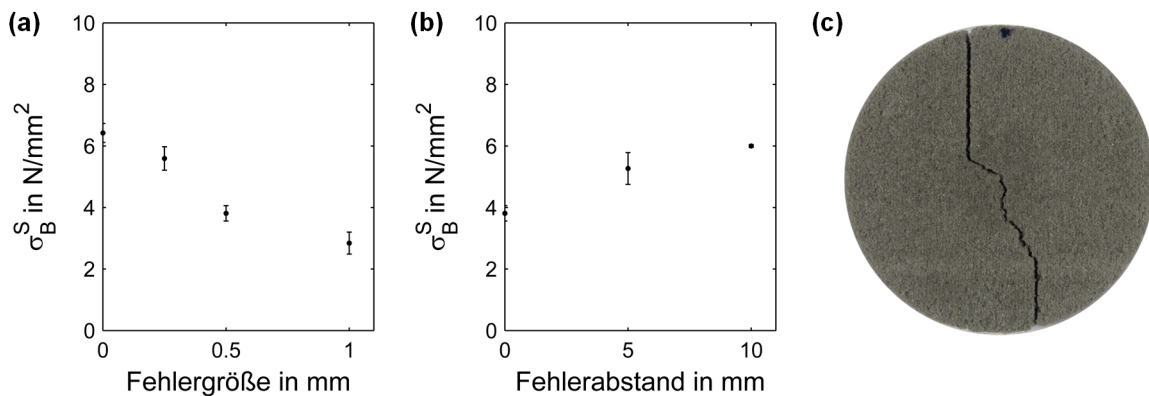


Abbildung 5.30: Darstellung der Festigkeit der Scheibenprüfkörper über der Fehlergröße (a) und dem Abstand des Fehlers zum Probenmittelpunkt (b) sowie Fotografie des Scheibenprüflings 55, der teilweise entlang der eingebrachten Ungänze versagt hat (c).

Bei dieser Versuchsreihe beträgt die mittlere Festigkeit der fünf Scheibenprüfkörper, die ohne Sollbruchstelle in der x1-Reihe hergestellt wurden, 6,42 MPa. Mit zunehmender Fehlergröße nimmt die Festigkeit bis auf einen Minimalwert von 2,84 MPa bei einer Fehlergröße von einem Millimeter ab. Der Abstand des Fehlers vom Probenzentrum zeigt ebenfalls einen deutlichen Zusammenhang mit der Festigkeit. Je weiter der Fehler (0,5 mm Breite) vom Mittelpunkt der Probe entfernt ist, desto weniger mindert er die Festigkeit. Bei einem Fehlerabstand von 10 mm zum Probenzentrum ist lediglich eine Reduktion um 0,42 MPa auf 6,00 MPa zu verzeichnen. Die dargestellte Scheibenprobe (c) beinhaltete einen Fehler von 0,5 mm Breite in 5 mm Abstand zur Probenmitte. Das Bruchbild zeigt wie der Rissverlauf im oberen Teil des Prüflings der eingebrachten Ungänze folgt. Im zweiten Job dieser Versuchsreihe wurden Fehler von 0,5 mm Breite in unterschiedlichen Orientierungen und Längen in die Scheibenprüfkörper eingebracht. Die Auswertung erfolgt in Abbildung 5.31 qualitativ anhand von photographischen Aufnahmen der Bruchstücke nach der Prüfung. Die Probenanordnung und -orientierung entspricht derer beim Drucken der Proben in der Jobbox.

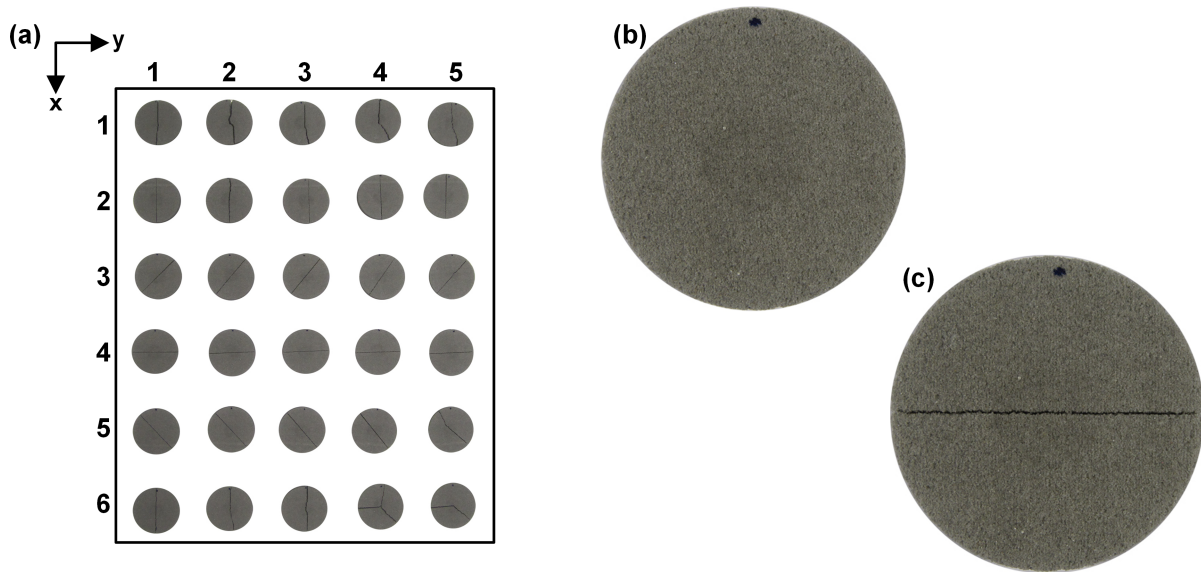


Abbildung 5.31: Fotografische Aufnahmen der Probenbruchstücke des Jobs mit Fehlern unterschiedlicher Orientierungen und Längen (a). Die Detailaufnahmen zeigen den Scheibenprüfkörper 45 vor (b) und nach (c) der Festigkeitsprüfung.

Die Übersichtsaufnahme (a) zeigt, dass die Proben der x1-Reihe, die keine Sollbruchstelle enthalten, in unterschiedlichen und teilweise wechselnden Orientierungen brechen. Die Proben der Reihen x2 bis x5 brechen ausnahmslos entlang der eingebrachten Fehlstellen (vgl. Abb. 4.25). Die Reihe x6 enthält unterschiedlich stark gekerbte Proben. Hier zeigen sich die Bruchbilder der Proben mit einer Kerbe von bis zu 15 mm Länge (ausgehend vom Probenrand) unbeeinflusst von jener. Bei Proben mit Kerben von 20 und 25 mm Länge erfolgt die Rissinitiation in der Schwachstelle. Die Detailaufnahmen der Probe 45 verdeutlichen, dass die Ungänze von 0,5 mm Breite vor der zerstörenden Prüfung optisch nicht sichtbar ist. Durch den Scheibentest kann die Orientierung eines solchen Fehlers aufgedeckt werden.

5.3.4 Qualitative Bewertung einer Realgeometrie

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde der Serienstand eines 3-Zylinder-Zylinderkopf Wassermantelkerns generativ hergestellt. Die Bauzeit betrug circa acht Stunden. Der 370 Schichten umfassende Druckprozess konnte ohne Störungen durchgeführt werden. Abbildung 5.32 zeigt den Kern in einer Gesamtansicht sowie zwei Detailaufnahmen.

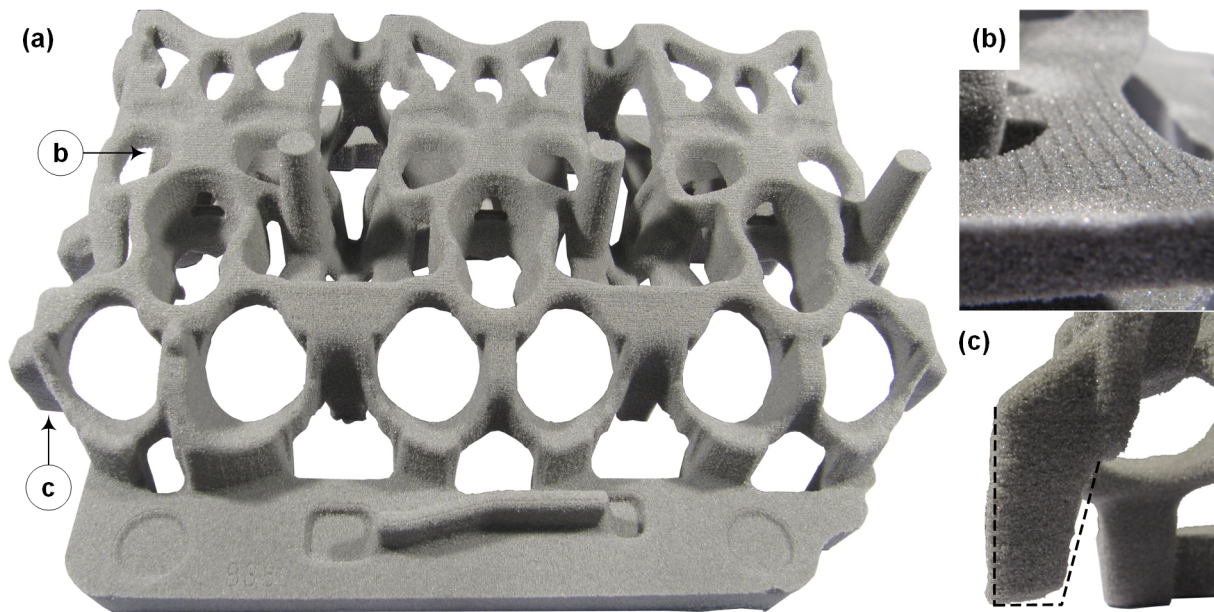


Abbildung 5.32: Fotografische Aufnahmen des gedruckten 3-Zylinder-Zylinderkopf Wassermantelkerns in der Übersicht (a) sowie Detailaufnahme von dem charakteristischen Stufenprofil (b) und einer durch Curl verursachten Maßabweichung (c)

Der Kern ließ sich nach der Trocknung durch Abblasen mit Druckluft und mechanischer Reinigung mittels Pinsel von Sandanhaftungen befreien. Er wies eine ausreichend hohe mechanische Stabilität auf, um das Handling während der Dokumentation unbeschadet zu überstehen. Die Detailaufnahme (b) zeigt das für additive Fertigungsverfahren charakteristische Treppenstufenprofil. In der Detailaufnahme eines der Kernlager (c) ist eine deutliche Abweichung zur Sollgeometrie (gestrichelte Linie) zu erkennen.

6 Interpretation

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit der Interpretation der Versuchsergebnisse. Zunächst findet die notwendige Fehlerbetrachtung statt. Kern des Kapitels bildet die empirische Modellbildung sowie die Diskussion der Hauptergebnisse. Abschließend werden die Erkenntnisse aus den ergänzenden Versuchsreihen interpretiert.

6.1 Fehlerbetrachtung

Vor der eigentlichen Interpretation der Ergebnisse soll in diesem Abschnitt eine Betrachtung der Fehler vorgenommen werden. Jeder Messwert setzt sich aus dem wahren Wert, einer systematischen Messabweichung (Ungenauigkeit) und einer zufälligen Messabweichung (Unsicherheit) zusammen (DIN 1996). Bei Wiederholmessungen wird der wahre Wert auch als der Erwartungswert bezeichnet. Mit steigender Anzahl der Wiederholmessungen kann die Unsicherheit minimiert werden und das arithmetische Mittel der Messwerte nähert sich immer weiter dem wahren Wert an (DIN 1995). Die Ungenauigkeit muss durch die Wahl geeigneter Messmittel minimiert werden (Bartholomé 1980, S. 45).

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnen Ergebnisse (Messwerte) unterliegen demzufolge sowohl systematischen als auch zufälligen Fehlern. Im folgenden Abschnitt werden zunächst die systematischen Fehler betrachtet. Hier liegt der Fokus auf den verwendeten Messgeräten und deren Genauigkeiten. Anschließend beleuchtet der Abschnitt die zufälligen Fehler, die entlang des in der Systembeschreibung vorgestellten Arbeitsflusses auftreten. Die Betrachtung der Fehler umfasst zudem Empfehlungen für die Minimierung dieser im Rahmen von weiterführenden Arbeiten.

6.1.1 Systematische Fehler

Systematische Fehler treten auf, da sich jeder experimentelle Versuchsaufbau von dem theoretisch angenommenen unterscheidet und Korrekturfaktoren, die diesen Unterschied berücksichtigen, oftmals unbekannt sind (Squires und Sighting 1971, S. 22). Praktisch gesehen, spiegelt sich dieser Umstand in der Messgenauigkeit von allen verwendeten Messgeräten wider. Systematische Fehler treten bei wiederholten Messungen bei identischen Messbedingungen stets in gleichem Betrag und mit gleichem Vorzeichen auf (Adunka 2007, S. 44). Daher können sie auch nicht durch Mehrfachmessungen kompensiert werden. Tabelle 6.1 listet die im Rahmen der Arbeit verwendeten Messmittel und ihre Messgenauigkeit (lt. Herstellerangaben) auf. Ebenfalls ordnet die Tabelle die Messmittel den jeweiligen Eingangs- bzw. Ausgangsgrößen zu.

Tabelle 6.1: Verwendete Messmittel, ihre Messgenauigkeit und jeweilige Messgröße

Messmittel	Messgenauigkeit	Messgröße
Wärmebildkamera	$\pm 0,04$ K (NTED)	$\Delta T^S, \Delta T^R$
Thermoelemente	$\pm 1,5$ K (Klasse 1)	$T_{B(L1-L5, R1-R5)}, T_{DK(I,A)}$
Feinwaage	$\pm 0,001$ g	$m_T, m_{T,IP}, \rho^S, \Delta m_F^R, \Delta m_A^R$
Trockenwaage (bei 50 g Einwaage)	$\pm 0,01\%$	ϕ_{SBS}, c_{DF}
Universalprüfmaschine (20 kN Kraftmessdose bei 500 N Last)	$\pm 0,4$ N	σ_B^S
Gasdurchlässigkeitsprüfgerät	± 1 Pa	K^S
Messschieber	$\pm 0,05$ mm	ρ^S, K^S, σ_B^S
Temperatursensoren	$\pm 0,5$ K	T_{IP}, T_{PP}
Feuchtigkeitssensoren	$\pm 3,5\%$	$\varphi_{IP}, \varphi_{PP}$
Temperaturregelung Klimakammer	$\pm 0,1$ K	T_T

Bartholomé (1980, S. 45) empfiehlt im Umgang mit systematischen Fehlern diese zu erkennen und zu beseitigen. Konkret bedeutet das die Wahl von Messmitteln, die eine hinreichende Genauigkeit bieten. Hinreichende Genauigkeit ist erlangt, wenn die systematischen Fehler im Vergleich zu den zufälligen Fehlern vernachlässigbar klein werden. Kann ein systematischer Fehler nicht vernachlässigt werden, so muss eine Berichtigung durch einen Korrekturfaktor erfolgen (Adunka 2007, S. 44).

6.1.2 Zufällige Fehler

Im Gegensatz zu systematischen Fehlern treten zufällige Fehler von Messung zu Messung in unterschiedlicher Größe und mit unterschiedlichem Vorzeichen auf (Squires 2001, S. 23). Sie können in jedem experimentellen Versuch auftreten und bewirken, dass der Messwert um den wahren Wert herum schwankt. Im Falle von zufälligen Fehlern gilt, dass mit zunehmender Anzahl an Wiederholmessungen die Wahrscheinlichkeit steigt, den wahren Wert einer Größe zu bestimmen. Dies geschieht über die Bildung des Mittelwerts aus den Ergebnissen mehrerer gleichartiger Messungen. Die Streuung der Einzelergebnisse um den Mittelwert herum wird durch die Standardabweichung wiedergegeben (DIN 1996). Im Folgenden werden die Ursachen für zufällige Fehler in Analogie zum Arbeitsfluss des Systems benannt, diskutiert und qualitativ bewertet sowie Empfehlungen für deren Minimierung gegeben.

Pre-Prozess

Der Faktor Binderkonzentration des SBS wird durch das Mischen von Formgrundstoff und Binder eingestellt. Hierbei kommt es je nach Sorgfalt der Arbeitsweise zu Fehlern bei der Einwaage der Materialien sowie zu Verlusten während des Mischprozesses. Die Herstellung der Mischung erfolgte durch die voxeljet AG. Da es sich beim Einwaage- und Mischvorgang um standardisierte Prozessschritte handelt, kann ein verhältnismäßig geringer zufälliger Fehler angenommen werden. Weitaus größeren Einflüssen auf das System hat die Qualität des verwendeten Formgrundstoffs und Binders. Der Formgrundstoff Quarzsand ist ein Naturprodukt, das beispielsweise in seiner Morphologie und chemischen Beschaffenheit variiert. Görke et al. (2014) zeigen auf, wie stark Dichte, Gasdurchlässigkeit und Festigkeit von der Morpholo-

gie des verwendeten Sandes abhängen. Die Spezifikation des verwendeten Formgrundstoffs gibt die mittlere Korngröße mit $17 \pm 0,02$ mm an. Die AFS-Kornfeinheitsnummer beträgt 82 mit einer Abweichung von ± 7 . Nach Görke et al. (2014) könnte bei einem ausreichenden Angebot an Binder eine Änderung der AFS-Zahl um 14 eine Veränderung der Festigkeit um bis zu 45% verursachen. Eine Qualitätskontrolle des Eingangsmaterials wurde nicht durchgeführt, daher muss von der Richtigkeit der Herstellerspezifikation ausgegangen werden. Aufgrund dieser Unsicherheiten birgt der Sand ein hohes Potential für zufällige Fehler.

Der verwendete Binder wurde ebenfalls von einer externen Quelle bezogen und unterlag lediglich einer optischen Eingangskontrolle. Stark verklumpte Binderlieferungen wurden aussortiert. Ein geeignetes Verfahren zur Bewertung der Reaktivität und Qualität des Binders fehlte allerdings. Wasserglas, als ein stark hygroskopischer Binder, verändert sich in Abhängigkeit seiner Lagerbedingungen und dem entsprechenden Angebot an Feuchtigkeit (Polzin 2012, S. 60). Um Unsicherheiten bzgl. des Formgrundstoffs und des Binders zu minimieren, wurden alle Versuchsreihen einer Binderkonzentration von 10% mit dem SBS der identischen Charge durchgeführt. Für Versuche mit anderen Binderkonzentrationen mussten eigene Chargen gemischt werden. Als Eingangskontrolle des bereitgestellten Materials diente die SBS-Feuchtigkeit ϕ_{SBS} . Jobs, die mit einem Bindergehalt von 10% durchgeführt wurden, zeigen Feuchtegehalte von 0,70% bis 0,88% bei einem Mittelwert von 0,77%. Wurde im Rahmen der Faktorvariation der Bindergehalt verändert, so konnten auch deutliche Unterschiede im Feuchtegehalt des SBS festgestellt werden. Abbildung 6.1 visualisiert die Verteilung der Feuchtegehalte für alle Jobs mit einer Binderkonzentration von 10% und die Abhängigkeit von ϕ_{SBS} vom Bindergehalt c_B .

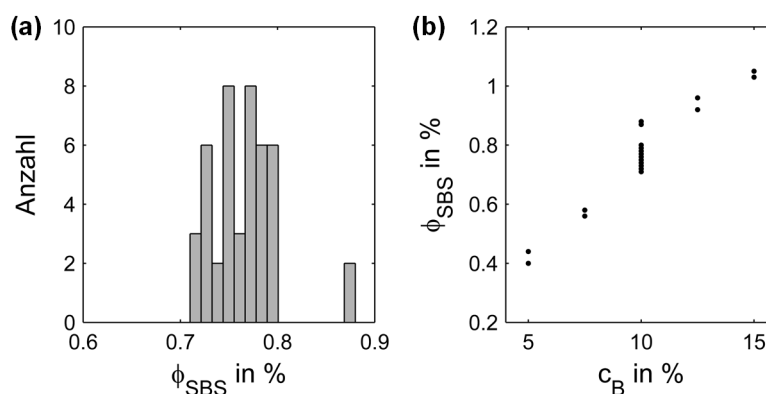


Abbildung 6.1: Histogramm der SBS-Feuchtigkeit ϕ_{SBS} aller Jobs, die mit einem Bindergehalt von 10% durchgeführt wurden (a) und Abhängigkeit von ϕ_{SBS} von c_B (b) für unterschiedliche Bindergehalte

Es lässt sich festhalten, dass die SBS-Feuchte größtenteils von der Konzentration des Binders abhängt. Somit ist anzunehmen, dass sich Feuchtigkeit aus der Umgebung überwiegend am Binder anlagert. Zwischen Feuchtegehalt des SBS und den untersuchten Qualitätsmerkmalen konnte kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden.

Ein Chargenwechsel des SBS mit gleicher Soll-Binderkonzentration führte zu deutlichen Veränderungen der Qualitätsmerkmale. Es ist also davon auszugehen, dass Qualität und Zustand des Sandes und des Binders einen erheblichen Einfluss auf das System nehmen. Demzufol-

ge werden sowohl weiterführende Untersuchungen zur Korrelation von Formstoffeingangsgrößen und Qualitätsmerkmalen als auch der Aufbau geeigneter Qualitätssicherungsmaßnahmen empfohlen.

Das eingetragene Druckfluid wurde ebenfalls über die voxeljet AG bezogen. Als Eingangskontrolle erfolgte die Konzentrationsbestimmung des Fluids c_{DF} mittels Trockenwaage. Der Feststoffgehalt des Fluids betrug stets zwischen 9% und 12%. Eine chemische Eingangskontrolle wurde nicht durchgeführt. Für die Aktivierung des Binders ist der verbleibende Wasseranteil des Druckfluids von 88% bis 91% verantwortlich. Aufgrund dieser verhältnismäßig kleinen Schwankungsbreite ist von einer geringen Beeinflussung der Qualitätsmerkmale durch das Druckfluid auszugehen. Dies setzt jedoch voraus, dass sich das Druckfluid für eine prozesssichere Tropfenerzeugung mit dem verwendeten Druckkopf eignet. Dafür müssen die physikalischen Eigenschaften des Fluids, wie beispielsweise Viskosität und Oberflächenspannung, exakt auf die Druckmodule eingestellt sein (Cibis und Krüger 2008).

Neben dem Materialzustand unterliegt der Anlagenzustand ebenfalls zufälligen Schwankungen. Das Positionierungssystem der Anlage ist als unkritisch zu bewerten. Durch regelmäßige Wartung kann Verschleiß und einer damit einhergehenden Abnahme der Genauigkeit vorgebeugt werden. In Bezug auf den Anlagenzustand ist vor allem das Fluidsystem, im Speziellen der Zustand des Druckkopfs, als kritisch zu bewerten. Durch die Bestimmung der Druckkopfqualität (Q_{DK}) und -stabilität (S_{DK}) vor jedem Job konnte die grundsätzliche Funktionalität sichergestellt werden. Dennoch waren im Laufe der Versuchsreihen wiederholt deutliche Veränderungen der Druckkopfcharakteristik zu beobachten. Die Auswirkungen eines instabil arbeitenden Druckkopfs für die Festigkeit der gedruckten Proben wurde in Abschnitt 5.1.2 dargestellt. Diese führten zur lokalen Abnahme der Festigkeit von bis zu 20%. Druckkopfinstabilitäten wurden durch verschiedene Maßnahmen kompensiert. Hierzu gehörten beispielsweise die Änderung der Versorgungsspannung und des Unterdrucks, oder eine intensive Reinigung oder der Austausch von Druckmodulen. Als Ursachen für die schwankende Leistung des Druckkopfs können interne Korrosion sowie unterschiedliche Fluidqualität genannt werden. Ebenfalls erwies sich eine sachgemäß eingerichtete Reinigungswalze als unerlässlich für einen zuverlässig arbeitenden Druckkopf. Der Einfluss des Druckkopfzustands auf das System kann als hoch eingestuft werden. Daher wird empfohlen, die Verträglichkeit des Druckkopfs mit dem verwendeten Druckfluid weiter zu optimieren und eine online In-Prozess-Überwachung der Druckkopfleistung aufzubauen.

Neben dem Druckkopf unterliegen sämtliche weitere Komponenten der Anlage zufälligen Schwankungen. Hier ist zunächst der Beschichter zu nennen, der das Partikelmaterial auf die Bauplattform aufbringt. Beim schichtweisen Partikelaufrag kann die geometrische Beschaffenheit der Beschichterklänge sowie die Geschwindigkeit des Schichtauftrags die Schüttdichte des Materials beeinflussen (Drummer et al. 2015). Folglich ändern sich auch die Prozess- und Prüfkörpereigenschaften. Sämtliche Versuche wurden daher mit der identischen Beschichterklänge und unveränderten Beschichtereinstellungen durchgeführt. Daher ist der Einfluss des Beschichters auf den Pre-Prozess als gering einzustufen.

Der Zustand des IR-Strahlers kann den Prozess und damit auch die Prüfkörpereigenschaften ebenfalls beeinflussen. Dieser muss in regelmäßigen Abständen gereinigt werden, damit die

Strahlungsleistung nicht durch eine äußere Kontamination des Strahlerglases gemindert wird. Die Schwankungen bezüglich der elektrischen Versorgung des Strahlers sind vernachlässigbar klein. Zusammenfassend lässt sich das Heizungssystem als unkritische Fehlerquelle bewerten.

Die Prozesssteuerung und -überwachung unterliegt ebenfalls zufälligen Schwankungen. Die Definition des Fluideintrags erfolgt über eine Anpassung der Druckauflösung dx in ganzen Mikrometern. Abhängig vom Ergebnis der Tropfenmassenbestimmung muss die Druckauflösung auf die nächstliegende ganze Zahl gerundet werden. Dies kann zu einem Unter- oder Überschätzen des Fluideintrags von bis zu 2% (bezogen auf den jeweiligen Fluideintrag) führen.

Die manuelle Positionierung und Einrichtung der Wärmebildkamera über dem Baufeld muss ebenfalls berücksichtigt werden. Steht die Kamera nicht senkrecht über dem Baufeld oder liegt es außerhalb des Kamerafokus, so kommt es zu Abweichungen bei der Aufzeichnung der Prozesstemperaturen ΔT^S und ΔT^R (Wegner 2013).

Sämtliche Standardjobs wurden auf Basis von identischen CAD-Daten im .stl-Format gebaut. Daher können die CAD-Daten als Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Generell ist jedoch bei der Konstruktion und dem Export von Geometriedaten für einen additiven Fertigungsprozess auf qualitativ hochwertige Daten zu achten (VDI 2015).

Tabelle 6.2 fasst die Betrachtung der zufälligen Fehler im Rahmen des Pre-Prozesses zusammen und beschreibt ihre Auswirkungen auf das System. Dabei wird der Einfluss von vernachlässigbar (x) über klein (-), mittel (o) bis hin zu groß (+) qualitativ bewertet.

Tabelle 6.2: Bewertung der zufälligen Fehler im Pre-Prozess

Eingangsgröße	Fehlerquelle	Bewertung
Binderkonzentration (c_B)	Einwaage, Mischverluste	-
Materialzustand (Sand)	Morphologie, Verteilung, chemische Zusammensetzung	+
Materialzustand (Binder)	Reaktivität, Morphologie, chemische Zusammensetzung, Feuchtegehalt	+
Materialzustand (Fluid)	chemische Zusammensetzung, Feststoffgehalt, Viskosität, Oberflächenspannung, Gasgehalt	-
Anlagenzustand (Positioniersystem)	Keine relevanten	x
Anlagenzustand (Fluidsystem)	Düsenstabilität, Reinigungswalze	+
Anlagenzustand (Materialsystem)	Klingengeometrie, Verunreinigungen	-
Anlagenzustand (Heizungssystem)	Elektrische Versorgung, Verunreinigung	-
Anlagenzustand (Prozesssteuerung und Überwachung)	Rundung des Fluideintrags, Position und Einrichtung der Wärmebildkamera	-
CAD-Daten	Keine relevanten	x

In-Prozess

Zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Schwankungen und Unsicherheiten im Rahmen des Pre-Prozesses, bringt der In-Prozess weitere zufällige Fehler mit sich. Im Verlauf eines Jobs kann es sowohl zu fallenden als auch zu steigenden Tropfenmassen und damit verändertem Fluideintrag kommen. Durch die Erwärmung des Druckkopfs während des In-Prozesses kommt es zu einem leichten Abfall der Fluidviskosität und somit zu steigenden Tropfengewichten. Ebenfalls können einzelne Düsen ausfallen und somit zu einer Verringerung des Fluideintrags führen. Diese gegenläufigen Phänomene können durch die Bestimmung der In-Prozess-Tropfenmassen $m_{T,IP}$ erfasst werden. Die Leistung des Druckkopfs kann als stabil betrachtet werden, solange keine optische Verschlechterung des Druckbilds (Steifigkeit) zu beobachten ist und $m_{T,IP}$ nicht mehr als 5% von der Pre-Prozess-Tropfenmasse m_T abweicht. Im Vergleich zu den im Pre-Prozess beschriebenen Fehlern, die durch den Zustand des Druckkopfs verursacht werden können, sind die beiden hier beschriebenen Abweichungen innerhalb der beschriebenen Grenzen als unkritisch zu beurteilen.

Zufällige Fehler, die durch die Faktoren Energieeintrag und Zykluszeit verursacht werden, sind vernachlässigbar klein. Solange die korrekten Bedieneingaben in der Prozessvorbereitung getätigt wurden, ist von keiner ungewollten Beeinflussung des Prozesses oder der Qualitätsmerkmale auszugehen.

Das Anlagenverhalten während eines Druckprozesses kann hingegen zufälligen Schwankungen unterliegen. Durch die Erwärmung des Bauraums während des Druckprozesses (mit aktivem IR-Strahler) kommt es zur zyklischen, thermischen Expansion der Beschichter Klinge, die fest eingespannt ist. Daher muss von einer leichten Verwindung ausgegangen werden. Angesichts der hohen Homogenität der In-Prozess-Schüttdichte (vgl. Abbildung 5.1.3) ist dieser Effekt unkritisch für die Qualitätsmerkmale. Eine stärkere Beeinflussung können Verunreinigungen am oder im Beschichter verursachen. Verunreinigungen an der Unterseite der Klinge können das Pulverbett durch Furchenbildung lokal beschädigen. Verunreinigungen im Beschichter führen zu einem inhomogenen Materialauftrag, da das Material nicht gleichmäßig nachfließen kann. Insgesamt lässt sich der Einfluss des Beschichters als mittelmäßig bewerten.

Während der Probenherstellung verursachen Schwankungen des In-Prozess-Klimas Unsicherheiten bezüglich des Prozesses und der Prüfkörpereigenschaften. Abbildung 6.2 zeigt ein typisches Klima in der Anlage während eines Jobs (T_{IP} und φ_{IP}) sowie die klimatischen Bedingungen während der sieben durchgeführten Referenzjobs.

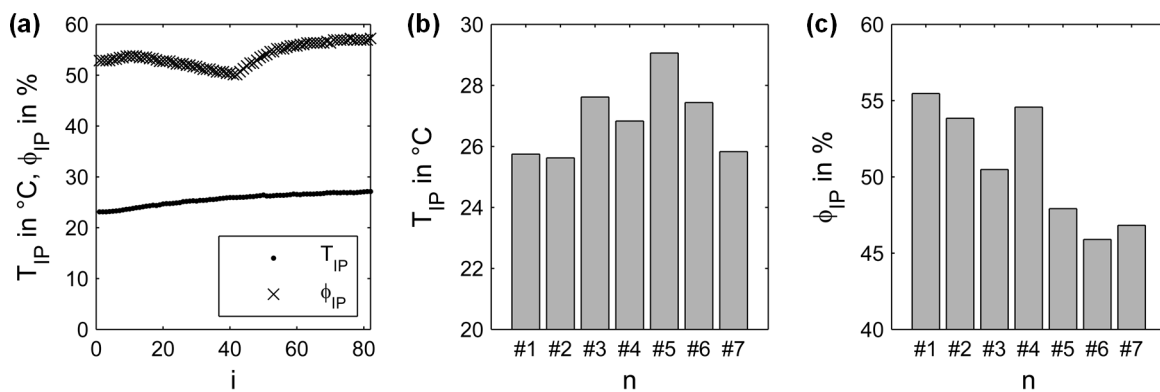


Abbildung 6.2: In-Prozess-Klima (T_{IP} und ϕ_{IP}) über der Schichtanzahl i während eines Referenzjobs (a), sowie T_{IP} und ϕ_{IP} jeweils über der Jobanzahl n während der 7 Referenzjobs

Mittels der in Abschnitt 4.3.5 beschriebenen Maßnahmen wurde während der Versuchsreihen ein möglichst konstantes Klima von 23°C und 50% relativer Luftfeuchtigkeit im Sandlabor und innerhalb der Anlage zu Prozessbeginn eingestellt. Ausgehend von diesen Bedingungen finden in der Anlage während der Vorlauf-Phase (Schicht 1 - 40) zunächst eine leichte Erwärmung und damit verbundene eine leichte Abnahme der relativen Luftfeuchte statt (a). Sobald die Druck-Phase beginnt und Fluid in das Baufeld eingetragen wird, misst der Klimasensor eine deutliche Steigerung der relativen Luftfeuchte. Die Steigung der Temperatur nimmt im Verlauf des Jobs kontinuierlich ab. Die Diagramme (b) und (c) zeigen die mittleren klimatischen Bedingungen während der sieben Referenzjobs. Das In-Prozess-Klima konnte hierbei in einem Bereich zwischen 25°C und 29°C sowie 45% und 55% relativer Luftfeuchte gehalten werden. Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung nehmen Einfluss auf das Verdunstungsverhalten von Wasser (Schrödter 1985, S. 65). Daher ist davon auszugehen, dass T_{IP} und ϕ_{IP} die Bindungsreaktion während des Prozesses beeinflussen. Die aufgezeichneten klimatischen Schwankungen konnten nicht eindeutig mit Schwankungen in den Prüfkörpereigenschaften der Referenzjobs korreliert werden. Daher ist von einer geringen Beeinflussung des In-Prozess-Klimas auf die Qualitätsmerkmale auszugehen. Dies gilt jedoch nur für die zuvor genannten engen Grenzen. Die Möglichkeit durch die Regelung des In-Prozess-Klimas Einfluss auf die Eigenschaften der gedruckten Kerne zu nehmen, sollte unbedingt in zukünftigen Arbeiten untersucht werden. Bei einer Klimatisierung der Prozesskammer sollte berücksichtigt werden, dass neben der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit, die vorherrschenden Strömungsbedingungen die Verdunstung beeinflussen (Schrödter 1985, S. 65).

Unterschiedliche Ursachen können zu Störungen während des In-Prozesses führen. Abhängig von der Art der Störung, unterbricht die Anlage entweder selbstständig den Fertigungsprozess oder dieser kann durch den Bediener unterbrochen werden. Solange die Prozessunterbrechung eine Zeitspanne von 60 Sekunden nicht überschreitet, ist von einer geringen Beeinflussung auszugehen. Je länger eine Prozessunterbrechung andauert, desto mehr Wärme verliert das Baufeld an die Umgebung. Dies kann nur bei verhältnismäßig kurzen Unterbrechungen durch den Energieeintrag der darauffolgenden Schichten kompensiert werden. Daher wird bei einer Unterbrechung von mehr als 60 Sekunden ein manueller Prozessabbruch und die Wiederholung des Versuchs empfohlen.

Tabelle 6.3 gibt einen Überblick über die zufälligen Fehler im Rahmen des In-Prozesses und bewertet diese analog zu der vorhergehenden Tabelle.

Tabelle 6.3: Bewertung der zufälligen Fehler im In-Prozess

Eingangsgröße	Fehlerquelle	Bewertung
Fluideintrag (E_F)	Druckkopf (stabil / instabil)	- / +
Energieeintrag (E_E)	Keine relevanten	x
Zykluszeit (t_Z)	Keine relevanten	x
Anlagenverhalten	Thermischer Verzug, Verunreinigungen der Beschichterklänge	o
In-Prozess-Klima	Umwelt	-
Störungen	Prozessunterbrechungen kürzer als 60 s	-

Post-Prozess

Die Faktoren des Post-Prozesses – Zeitspanne vor Trocknung, Trocknungsdauer, Zeitspanne nach Trocknung und Trocknungstemperatur – verursachen allesamt gering einzuschätzende zufällige Fehler. Hier muss durch den Bearbeiter die Einhaltung der jeweiligen Zeiträume sichergestellt werden. Ebenfalls ist auf die korrekte Positionierung der Prüfkörper in der Klimakammer zu achten. Die Temperatur innerhalb der Klimakammer wird beim Einführen der Proben durch die geöffnete Tür kurzzeitig gestört. Die Regelung der Kammer vermag dies innerhalb von wenigen Minuten auszugleichen. Lediglich bei denen für 15 Minuten getrockneten Proben ist von einer mittelmäßigen Beeinflussung auszugehen. Beim Regelfall der einstündigen Trocknung ist dieser Effekt als minimal einzuschätzen.

Wie bereits beim In-Prozess nimmt auch beim Post-Prozess das Umgebungsklima Einfluss auf die Eigenschaften der Prüfkörper. Abbildung 6.3 zeigt ein typisches Klima im Sandlabor während der einwöchigen Lagerung entsprechender Prüfkörper.

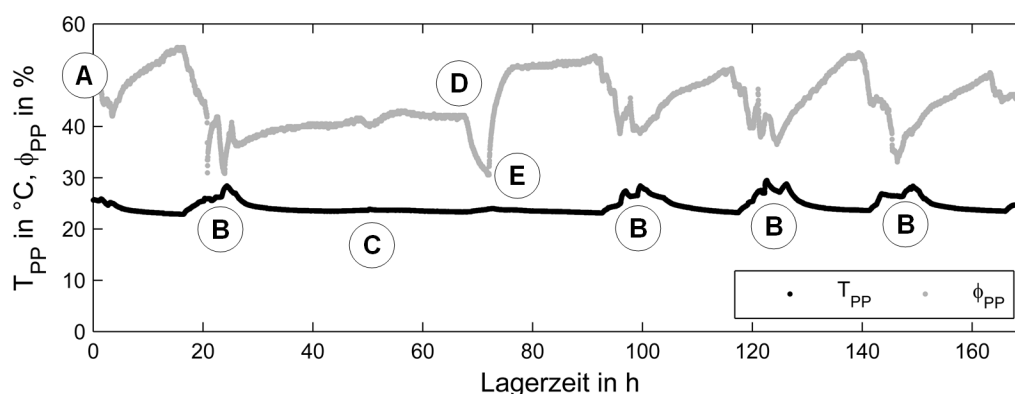


Abbildung 6.3: Post-Prozess-Klima (T_{PP} und φ_{PP}) über der Lagerzeit im Sandlabor mit charakteristischen Ereignissen. A = Jobende und Beginn der Lagerzeit von 168 Stunden, B = Durchführung eines Jobs, C = Wochenende, D = Ausfall der Raumluftbefeuchtung, E = Wiederinbetriebnahme am Montagmorgen.

Die Auftragung des Post-Prozess-Klimas über die Lagerdauer eines einwöchig (168 Stunden) gelagerten Jobs hinweg zeigt die klimatischen Schwankungen im Sandlabor. Diese weisen ein charakteristisches Muster auf. Bei der Durchführung eines Jobs (B) steigt durch den Betrieb der Anlage und die Anwesenheit von Personen die Raumtemperatur. Gleichzeitig fällt die relative Luftfeuchte. Findet über längere Zeit kein Versuch statt (C), pendeln sich Temperatur und Luftfeuchte auf einem konstanten Niveau ein. Ein Ausfall des Luftbefeuchters bewirkt ein deutliches Absenken der relativen Luftfeuchte (D). Dieses kann nach der Wiederinbetriebnahme (E) kompensiert werden. Die im Rahmen des Pre-Prozesses beschriebenen Effekte, die den Wasserglasbinder in Abhängigkeit seiner Lagerbedingungen beeinflussen, machen sich ebenfalls während des Post-Prozesses bemerkbar. Bei der Trocknung handelt es sich um eine (teilweise) reversible Reaktion (Wallenhorst 2010). Daher ist davon auszugehen, dass T_{PP} und φ_{PP} maßgeblich die Probeneigenschaften während der Lagerung beeinflussen. Die Auswirkungen des Post-Prozess-Klimas auf die Prüfkörpereigenschaften hängen davon ab, wie lange die Prüflinge dem Lagerklima ausgesetzt sind (vgl. Abschnitt 5.2.7). Bei unmittelbarer Bewertung bzw. Verarbeitung der gedruckten Teile nach dem Trocknen ist das Post-Prozess-Klima vernachlässigbar. Je länger die Proben jedoch gelagert werden, desto stärker ändern sich die Qualitätsmerkmale. Ab einer Lagerdauer von mehreren Stunden muss von einer erheblichen Beeinflussung ausgegangen werden. Wie unterschiedliche Lagerklimata auf die Eigenschaften der gedruckten Kerne Einfluss nehmen, sollte in weiterführenden Arbeiten genauer charakterisiert werden.

Das Handling der Proben auf dem Transportgitter während des Post-Prozesses bringt nur geringfügige Unsicherheiten mit sich. Die Arbeitsabfolge sieht vor, dass die Prüfkörper erst unmittelbar vor der Charakterisierung der Qualitätsmerkmale direkt angefasst werden.

Tabelle 6.4 fasst die zufälligen Fehler im Rahmen des Post-Prozesses zusammen und bewertet diese analog zu den vorhergehenden Tabellen.

Tabelle 6.4: Bewertung der zufälligen Fehler im Post-Prozess

Eingangsgröße	Fehlerquelle	Bewertung
Zeitspanne vor Trocknung (t_{vT})	Bearbeiter	-
Trocknungsdauer (t_T)	Bearbeiter	-
Zeitspanne nach Trocknung (t_{nT})	Bearbeiter	-
Trocknungstemperatur (T_T) (kurze / lange Trocknung)	Öffnen der Klimakammer	o / -
Post-Prozess-Klima (kurze / lange Lagerung)	Umwelt	x / +
Handling	Bearbeiter	-

Quantifizierung der Qualitätsmerkmale

Im direkten Anschluss an den Post-Prozess erfolgt die Quantifizierung der Qualitätsmerkmale. Diese erfordert einen direkten händischen Kontakt mit den jeweiligen Prüfkörpern. Grundsätzlich ist bei der Handhabung der Prüfkörper größtmögliche Achtsamkeit erforderlich. Vor allem Proben mit geringer Festigkeit sind anfällig für mechanische Beschädigungen.

Die Bestimmung der Dichte an den Scheibenprüfkörpern erfordert das Einlegen in die Stahl-schablone und das Abreiben auf die Nennhöhe von 10 mm. Nach dem Abreiben schwanken die Probendicken zwischen 10,1 und 9,9 mm. Bei einem typischen Probengewicht von 25 g können diese Schwankungen der Probenhöhe zu maximalen Abweichungen der Dichte von $\pm 0,013 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ führen. Die hohe Reproduzierbarkeit der Dichtebestimmungen der Referenzjobs (vgl. Abbildung 5.7(b)) verdeutlicht, dass diese möglichen Maximalabweichungen durch die Mittlung über 15 Prüfkörper kompensiert werden. Daher kann der Einfluss der Handhabung bei der Bestimmung der Dichte als minimal eingeschätzt werden.

Bei der Bestimmung der Permeabilität wird der Scheibenprüfkörper durch händisches Aufpumpen der Dichtmanschette geklemmt und gedichtet. Je nach eingebrachtem Innendruck der Dichtmanschette kommt es zu unterschiedlicher Leckströmung am Probenrand. Diesem Effekt wurde durch maximales Aufpumpen der Dichtmanschette entgegnet. Des Weiteren konnte bei der Überprüfung des Geräts durch die Kalibrierdüse eine Schwankung der Druckdifferenz von $\pm 5 \text{ Pa}$ festgestellt werden. Diese geht sowohl quadratisch als auch linear in die Berechnung der Permeabilität ein (vgl. Formel 11). Sie verursacht bei einer typischen, gemessenen Druckdifferenz von 100 Pa eine maximale Abweichung von ca. $\pm 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Bei größeren Abweichungen musste eine erneute Kalibrierung durch den Hersteller vorgenommen werden. Die Ursachen für diese Schwankungen sowie den Verlust der Kalibrierung konnten im Rahmen der Untersuchungen nicht geklärt werden. Die beschriebenen Effekte summieren sich zu einer hohen Unsicherheit bei der Bestimmung der Permeabilität auf. Dies spiegelt sich in den großen Schwankungen der Permeabilitäten der Referenzjobs (vgl. Abbildung 5.7(c)) wider. Für weiterführende Untersuchungen wird eine Optimierung des vorhandenen Messverfahrens bzw. die Entwicklung eines verbesserten Prüfgeräts empfohlen.

Bei der Ermittlung der Bruchspannung sind die Einflüsse durch die Handhabung der Proben minimal. Das standardisierte Vorgehen und die Positionierhilfen an der Prüfapparatur sichern die Wiederholbarkeit der Messungen. Für die Umrechnung der gemessenen Bruchkraft in die Bruchspannung σ_B^S wird ein materialabhängiger Vorfaktor benötigt (vgl. Formel 2). Da die Ergebnisse dieser Arbeit relativ innerhalb eines Materialsystems betrachtet werden, ist der Fehler durch diesen Vorfaktor vernachlässigbar. Erfolgt ein Vergleich unterschiedlicher Materialien bzw. der Vergleich mit Spannungen, die mittels eines anderen Festigkeitsprüfverfahrens aufgenommen wurden, so müssen entsprechende Vorfaktoren ermittelt werden.

Die Bestimmung der Probenfeuchte erfolgt stets an den Bruchstücken der Scheibenprüfkörper 12 und 14 eines Standardjobs. Da bis auf das Einlegen der Proben in die Trockenwaage die Ermittlung des Wassergehalts vollautomatisch erfolgt, kann von einem geringen zufälligen Fehler ausgegangen werden.

Bei der Beurteilung der Curlneigung wird zwischen fünf verschiedenen Ausprägungen unterschieden. Curl wird als solcher bewertet, falls die Intensität die Stufen 3, 4 oder 5 erreicht. Da dies optisch vom jeweiligen Betrachter beurteilt wird, kann es besonders im Grenzbereich (zwischen Intensität 2 und 3) zu Fehlinterpretationen kommen. Demzufolge ist bei der Bewertung der Curlneigung von einem mäßigen, zufälligen Fehler auszugehen.

Zur Bestimmung der Fluidmigration ist das händische Abblasen der Ringprüfkörper mit Druckluft erforderlich. Hier kann es durch schwankende Entfernungen zwischen der Druckluftdüse

und dem Prüfkörper zu einem Unterschied in der Intensität des Druckluftstrahls kommen. Die Abblasdauer von 10 Sekunden muss von dem Bearbeiter möglichst genau eingehalten werden. Bei der Handhabung der Prüfkörper kommt es zu leichtem Sandabrieb an den Kontaktstellen. Dies kann vor allem bei Prüfkörpern geringer Festigkeit zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen. Bei sorgfältiger Arbeitsweise ist für Prüfkörper, die einen Abrieb von weniger als 1% aufweisen von einer geringen Beeinflussung durch die manuelle Arbeitsweise auszugehen. Bei Proben, die geringe Festigkeiten und hohen Abrieb aufweisen, ist bei der Quantifizierung der Fluidmigration von einem mittelmäßigen zufälligen Fehler auszugehen. Zur Reduktion dieser Unsicherheit wäre eine definierte, automatisierte Probennachbehandlung vorteilhaft.

Die Ermittlung des Abriebs hingegen erfolgt größtenteils automatisiert. Die Proben werden in das Gerät eingelegt, belastet und für 20 Sekunden abgerieben. Hier kommt es lediglich beim Einlegen und Entnehmen der Proben aus dem Gerät zu geringfügigen Sandabrieb. Daher kann von einem geringen Fehler ausgegangen werden.

Tabelle 6.5 bewertet qualitativ die zufälligen Fehler, die bei der Quantifizierung der Qualitätsmerkmale auftreten.

Tabelle 6.5: Bewertung der zufälligen Fehler bei der Quantifizierung der Qualitätsmerkmale

Eingangsgröße	Fehlerquelle	Bewertung
Dichte (ρ^S)	Handhabung	-
Permeabilität (K^S)	Handhabung, Gerät	+
Festigkeit (σ_B^S)	Handhabung	-
Probenfeuchte (ϕ^S)	Handhabung	-
Curlneigung (C^R)	Optische Bewertung	o
Fluidmigration (Δm_F^R) (Abrieb gering / hoch)	Handhabung	- / o
Abrieb (Δm_A^R)	Handhabung	-

Qualitative Bewertung

Bei der qualitativen Bewertung der Prüflinge wird jeweils ein charakteristischer optischer und haptischer Eindruck beschrieben. Dieser ist naturgemäß subjektiv. Die im Rahmen der Charakterisierung der Mikrostrukturen ausgewählten REM-Aufnahmen zeigen stets repräsentative Ausschnitte der jeweiligen Proben.

6.2 Empirische Modellbildung und Diskussion

In diesem Abschnitt wird für jedes Hauptergebnis zunächst die Signifikanz der Eingangsgrößen (Faktoren) für die jeweilige Ausgangsgröße festgestellt. Als Datenbasis dienen die einzelnen, gemessenen Werte jeder untersuchten Probe. Das angestrebte Modell soll eine positionsunabhängige (bezogen auf die Position innerhalb der Jobbox) Gültigkeit besitzen. Des Weiteren soll es die Reproduzierbarkeit berücksichtigen. Demzufolge setzt sich eine Datenmenge eines Faktors an einer Stufe aus der Anzahl der gleichartigen Proben in einem Job (i.d.R. 15) und der Anzahl an Wiederholungen auf dieser Stufe zusammen. Wurden zum Beispiel drei Wiederholungen an einer Faktoreinstellung durchgeführt, so gehen 45 Proben in die Signifikanzanalyse an dieser Stufe ein. Die zuvor beschriebenen Fehler verursachen eine Streuung der Mess-

werte um den wahren Wert (Erwartungswert) der Zielgröße. Diese Streuung wird durch die Standardabweichung s angegeben. Sie berechnet sich zu:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

\bar{x} ist das arithmetische Mittel aus den Einzelmessungen x_1 bis x_n und gibt den Erwartungswert an. Die Varianz s^2 erhält man über das Quadrieren der Standardabweichung. Um zu untersuchen, ob sich der Mittelwert einer Messreihe \bar{x}_1 mit der zugehörigen Varianz s_1^2 signifikant von dem Mittelwert einer anderen Messreihe \bar{x}_2 mit der Varianz s_2^2 unterscheidet, gibt es verschiedene statistische Methoden. Zur Bestimmung der Signifikanz eines Faktors für ein Hauptergebnis wird im vorliegenden Fall ein *f-Test* herangezogen (Bartholomé 1980, S. 43). Hierbei bildet man aus den Varianzen s_1^2 und s_2^2 von zwei Versuchsreihen mit jeweils n_1 bzw. n_2 Einzeldaten den Quotienten F (Prüfgröße). Die erste Versuchsreihe umfasst dabei alle Einzelmessungen der Anzahl n_{ges} innerhalb einer Faktorvariation (z.B. Bindergehalt). Aus ihr erhält man die Gesamtvarianz aller Werte dieser Faktorvariation s_{ges}^2 . Je nach variiertem Faktor gibt es unterschiedlich viele Versuchsreihen, die für den Vergleich der Varianzen in Frage kommen (im Falle des Faktors Bindergehalt wurde auf 5 Stufen variiert). Daher wird diejenige Faktoreinstellung für die zweite Reihe an Einzeldaten der Anzahl n_{max} ausgewählt, die innerhalb der Faktorvariation die größte Einzelvarianz s_{max}^2 aufweist. Die berechnete Prüfgröße F vergleicht man mit dem kritischen *f*-Wert f_{krit} . Dieser lässt sich abhängig von der geforderten Wahrscheinlichkeit P und der Anzahl der jeweiligen Populationen n_{ges} und n_{max} aus Tabellenwerken entnehmen (L. Sachs 1972, S. 117). Die Berechnung mit Hilfe eines *f*-Wert-Berechners ist ebenfalls möglich (Andreß 2010). Unterscheidet sich die größte Einzelvarianz s_{max}^2 signifikant von der Gesamtvarianz s_{ges}^2 einer Faktorvariation ist sichergestellt, dass sich alle kleineren Einzelvarianzen auch signifikant unterscheiden. Es können folgende Hypothesen aufgestellt werden:

$$h_0 : s_{max}^2 \geq s_{ges}^2 \quad (17)$$

$$h_1 : s_{max}^2 < s_{ges}^2 \quad (18)$$

Trifft die Hypothese h_0 zu, ist die größte Einzelvarianz der Faktorvariation größer oder gleich der Varianz aller Werte der Faktorvariation. Trifft die Hypothese h_1 zu, ist die größte Einzelvarianz der Faktorvariation kleiner der Varianz aller Werte der Faktorvariation. Die Prüfgröße F berechnet sich für den vorliegenden Fall zu:

$$F = \frac{s_{ges}^2}{s_{max}^2} \quad (19)$$

Die Hypothese h_1 soll mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% zutreffen. Aus dieser Wahrscheinlichkeit sowie den Varianzen und der Anzahl der jeweiligen Populationen lässt sich der jeweilige *f*-Wert, wie zuvor beschrieben, ableiten. Gilt $F > f_{krit}$, trifft h_1 mit der geforderten Wahrscheinlichkeit zu und die Varianz der jeweiligen Ausgangsgröße wird signifikant von dem untersuchten Faktor beeinflusst. Sämtliche Werte für n_{ges} , n_{max} , F und f_{krit} finden sich im Anhang (Abbildung 4). Ist die Signifikanzbedingung für einen Faktor erfüllt, wird er in die nachfolgende Regressionsanalyse und Diskussion aufgenommen.

Die Regressionsanalyse stellt den mathematischen Zusammenhang zwischen den signifikanten Faktoren und dem jeweiligen Hauptergebnis her. Hierzu muss zunächst eine Normierung der Daten erfolgen. Jeder Faktor wird auf die Faktoreinstellung des Referenzjobs normiert. Der Faktor Trocknungstemperatur, der in °C angegeben ist, wird vor der Normierung in Kelvin umgerechnet. Bei den Hauptergebnissen erfolgt die Normierung der Werte auf den Mittelwert des jeweiligen Hauptergebnisses bei Referenzeinstellungen. Normierte Größen werden durch einen * im Index gekennzeichnet. Die Gewichtung der Mittelwerte erfolgt entsprechend der Anzahl der Wiederholungen bei einer Faktoreinstellung. Basierend auf den normierten und gewichteten Daten erfolgt die Regressionsanalyse mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate nach DIN (1999). Die resultierende Funktion stellt den mathematischen Zusammenhang zwischen den signifikanten Faktoren und der jeweiligen Ergebnisgröße dar. Das Bestimmtheitsmaß R^2 , welches Werte zwischen 0 und 1 annimmt, berechnet sich aus der Summe der quadratischen Differenzen der Messwerte und der Funktionswerte. Je näher R^2 an 1 liegt, desto größer ist der Anteil der Varianz eines Ergebnisses, der durch das Modell erklärt werden kann. Bei der graphischen Darstellung der Modelle werden die normierten Ergebnisse (mit ihren Standardabweichungen $\pm s$), die ermittelte Regression (schwarze Linie) und soweit möglich ein Vertrauensbereich des Modells (graue Linien) aufgetragen. Hier wurde das nach Adunka (2007, S. 160) gängige Konfidenzintervall von 0,95 gewählt. Dieses Intervall spannt – basierend auf vorhandenen Ergebnissen – einen Bereich auf, in dem sich zukünftige Beobachtungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% befinden. Im Anschluss an die jeweilige Regressionsanalyse folgen die Diskussion der postulierten Zusammenhänge sowie Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen.

6.2.1 Prozesstemperatur der Scheibenprüfkörper

Die Signifikanzanalyse zeigt, dass die Prozesstemperatur der Scheibenprüfkörper ΔT^S von den Faktoren Energieeintrag E_E und Zykluszeit t_Z abhängt. Abbildung 6.4 zeigt die ermittelten Abhängigkeiten der normierten Prozesstemperatur ΔT^{S*} von dem normierten Energieeintrag E_E^* und der normierten Zykluszeit t_Z^* .

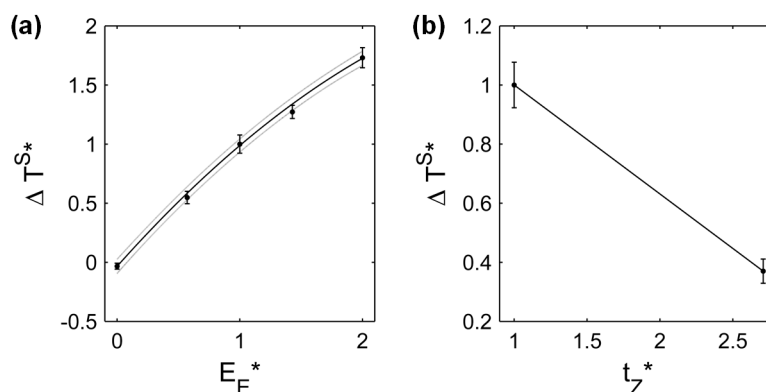


Abbildung 6.4: Regressionsanalyse für die Abhängigkeit der normierten Prozesstemperatur ΔT^{S*} von dem normierten Energieeintrag E_E^* (a) und der normierten Zykluszeit t_Z^* (b)

Für die Abhängigkeit der Prozesstemperatur von dem Energieeintrag (a) wird das folgende Polynom zweiten Grades (Formel 20) angenähert.

$$\Delta T^{S*} = f(E_E^*) = f(x_3) = -0,1422 \cdot x_3^2 + 1.164 \cdot x_3 - 0.03407 \quad (20)$$

Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 0,9986. Die Belichtung des SBS mit dem IR-Strahler bewirkt eine Erwärmung der Baufeldoberfläche. Diese ist Abhängig von dem Absorptionsgrad (= Emissionsgrad) des bestrahlten Materials. Nach Literaturangaben liegt der Absorptionsgrad von reinem Quarzsand bei 0,76 (Baehr und Stephan 2010, S. 737) und der von Graphitpulver (Additiv im SBS) bei 0,95 (Kramer 2002, S. 480). Der Absorptionsgrad des Binders ist unbekannt. Demzufolge ist auch der exakte Absorptionsgrad des SBS unbekannt. Er kann zwischen 0,76 und 0,95 angenommen werden und hängt von einer Vielzahl weiterer Parameter, wie der chemischen Zusammensetzung, der Temperatur und der Oberflächenbeschaffenheit ab (Fouad und Richter 2008, S. 17). Auf Basis der bekannten Materialdaten und der Messergebnisse kann angenommen werden, dass ein Großteil der vom IR-Strahler abgegebenen Strahlungsenergie vom Materialbett absorbiert wird. Daher ist die thermische Aktivierung mittels IR-Strahler für dieses Materialsystem grundsätzlich geeignet. Mit steigendem Energieeintrag ist ein leichtes Abflachen der Kurve festzustellen. In Gleichung 20 entspricht dies dem negativen Vorfaktor des quadratischen Anteils. Je größer die eingetragene Energiemenge und damit auch die Erwärmung des Baufelds ist, desto größer ist auch die Temperaturdifferenz zu seiner Umgebung. Wegner (2013) stellt bei der Untersuchung der Temperaturverteilung eines mittels IR-Strahler beheizten Kunststoff-Lasersinterprozesses einen vergleichbaren Effekt fest. Er begründet abfallende Temperaturen mit Wärmeleitung zwischen Baufeld und Behälter (Jobbox) sowie mit Konvektion in der Prozesskammer. Im Vergleich zu den Baufeldoberflächentemperaturen beim Kunststoff-Lasersinterprozess (ca. 180°C) sind die im Rahmen dieser Arbeit maximal auftretenden Baufeldoberflächentemperaturen mit ca. 60°C (Bestimmung aufgrund des unbekanntem Emissionsgrads nicht exakt möglich) verhältnismäßig gering. Demnach sind diese Wärmeverluste in dem untersuchten Temperaturbereich nahezu vernachlässigbar. Bei höherem Energieeintrag und damit steigenden Baufeldtemperaturen werden jedoch die Wärmeverluste durch Wärmeleitung und Konvektion zunehmend stärker und müssen daher bei der thermischen Prozessführung mit berücksichtigt werden.

Aufgrund der Datenbasis (2 Stufen) kann zwischen der Prozesstemperatur und der Zykluszeit lediglich ein linearer Zusammenhang abgeleitet werden. Er wird durch Formel 21 beschrieben.

$$\Delta T^{S*} = f(t_Z^*) = f(x_4) = -0.3688 \cdot x_4 + 1.369 \quad (21)$$

Je länger die Zykluszeit ist, desto mehr Wärme kann von dem Materialbett an die Umgebung abgegeben werden. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde die Schichtzeit innerhalb eines Jobs durch die gleichbleibende Geometrie des Standardjobs konstant auf dem designierten Wert gehalten. Bei der Herstellung von komplexen Geometrien unterscheiden sich die bedruckten Bereiche und damit auch die Schichtzeiten von Schicht zu Schicht. Daher muss die Zykluszeit bei der Prozessauslegung berücksichtigt werden. Der Faktor Zykluszeit spielt bei dem Typ bzw. der Ausstattung des 3-D-Druckers auf dem die Proben hergestellt werden eine wesentliche Rolle. In der Regel wird eine Beschleunigung des Herstellungsprozesses durch den Einsatz größerer Druckköpfe oder leistungsfähigerer Positionierungssysteme angestrebt

(Höchsmann 2014). Kommt es hierdurch zu einer stärkeren Reduktion der Zykluszeit, müssen die Folgen für die Prozess- und Teileigenschaften in Betracht gezogen werden. Daher wird empfohlen, den Faktor Zykluszeit sowohl in Bezug auf variierende Zeiten innerhalb eines Jobs als auch bezüglich kürzerer Zeiten, in weiterführenden Arbeiten näher zu untersuchen.

6.2.2 Dichte

Das Hauptergebnis Dichte ρ^S hängt signifikant von den vier Faktoren Binderkonzentration c_B , Fluideintrag E_F , Energieeintrag E_E und Zykluszeit t_Z ab. Abbildung 6.5 stellt die Ergebnisse der Regressionsanalysen grafisch dar.

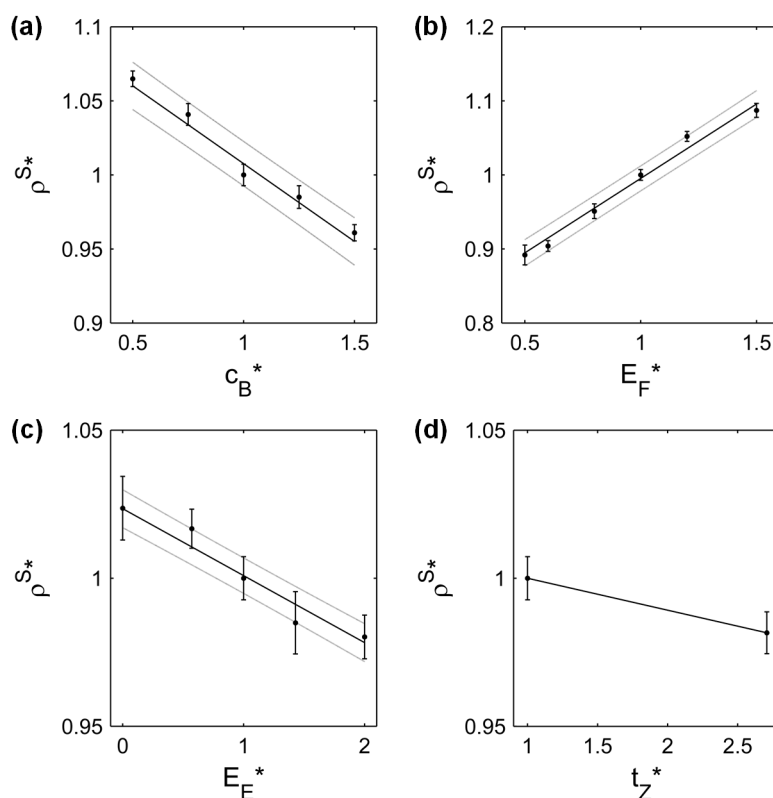


Abbildung 6.5: Regressionsanalyse für die Abhängigkeit der normierten Dichte ρ^{S*} von der normierten Binderkonzentration c_B^* (a), dem normierten Fluideintrag E_F^* (b), dem normierten Energieeintrag E_E^* (c) und der normierten Zykluszeit t_Z^* (d)

Im Falle des Qualitätsmerkmals Dichte können für alle signifikanten Faktoren lineare Zusammenhänge angenähert werden. Die Relation zwischen der Dichte und der Binderkonzentration gibt Gleichung 22 wieder.

$$\rho^{S*} = f(c_B^*) = f(x_1) = -0,105 \cdot x_1 + 1,113 \quad (22)$$

R^2 beträgt hier 0,9649. Die Abnahme der Dichte mit einer Zunahme der Binderkonzentration kann auf das Quellen des Wasserglases bei Kontakt mit Wasser zurückgeführt werden. Dieses Phänomen ist aus der Zementverarbeitung mit Wasserglas bekannt. Brintzinger und Bubam (1933) stellten fest, dass bei der Einwirkung von Flüssigkeiten auf feste Stoffe, die in der Bildung

eines gallertigen Stoffes resultiert, mit einer Volumenzunahme dieser Stoffe zu rechnen ist. Je mehr Wasserglas demzufolge im SBS vorhanden ist, desto stärker tritt eine Quellung des Wasserglases, verbunden mit einer Dichteabnahme der Probekörper, auf.

In Bezug auf den Faktor Fluideintrag zeigt sich ein entgegengesetzter Zusammenhang. Hier steigt die Dichte mit zunehmendem Fluideintrag linear an. Den Zusammenhang beschreibt die folgende Gleichung.

$$\rho^{S*} = f(E_F^*) = f(x_2) = 0,201 \cdot x_2 + 0,7943 \quad (23)$$

R^2 wird für diesen Fall mit 0,9885 angegeben. Der Feststoffanteil im Druckfluid beträgt ca. 10% (vgl. Abschnitt 6.1.2). Vergleicht man die Dichte der Prüfkörper, die mit 5% und 15% Fluideintrag hergestellt wurden, so ist eine Dichtezunahme von ca. 20% zu verzeichnen. Dies entspricht einer Gewichtszunahme eines Scheibenprüfkörpers von ca. 22 g auf ca. 27 g. Da Proben die mit 5% und 15% Fluideintrag gedruckt wurden ähnliche Feuchtegehalte zeigen (vgl. Abbildung 5.14(e)), wäre anzunehmen, dass der zusätzlich eingetragene Feststoff aus dem Druckfluid für diese Gewichtszunahme verantwortlich ist. Eine Steigerung des Fluideintrags um 10% führt jedoch nur zu einem zusätzlichen Feststoffgewicht von ca. 0,3 g in einem Scheibenprüfkörper. Demzufolge kann der zusätzliche Feststoff aus dem Druckfluid nur ca. 1% der ca. 20%-igen Dichtezunahme erklären. Die weitaus größere Zunahme der Dichte, die im Experiment beobachtet wurde, kann durch den Effekt der Liquefaktion erklärt werden (Schulze 2014, S. 25). Dieser Effekt beschreibt den Übergang eines Schüttguts in eine Suspension: Je stärker das Partikelmaterial mit Druckfluid gesättigt ist, desto stärker kommt es zum Aufbrechen der Schüttgutstruktur. Die Partikel nehmen aufgrund der Schwerkraft eine dichtere Packung an. Dieser Effekt wird durch das Beschichten mit einer Schwingklinge verstärkt, da die eingebrachten Schwingungen das Aufbrechen der Schüttgutstruktur begünstigen.

Bei steigendem Energieeintrag reagiert das System mit einer Abnahme der Dichte. Der Zusammenhang wird durch Gleichung 24 beschrieben.

$$\rho^{S*} = f(E_E^*) = f(x_3) = -0,02262 \cdot x_3 + 1,024 \quad (24)$$

Das Bestimmtheitsmaß der Regression beträgt 0,9721. Hier tritt eine Kombination der zwei zuvor beschriebenen Effekte auf. Brintzinger und Bubam (1933) stellen fest, dass die Quellgeschwindigkeit mit steigender Temperatur zunimmt. Für den schichtweisen Aufbau der Proben im 3-D-Drucker bedeutet dies, dass es mit höherem Energieeintrag zum stärkeren Quellen jeder bedruckten Schicht einer Probe kommt. Dadurch lockert die Probe während des Bauprozesses auf, wodurch sich die Dichte reduziert. Des Weiteren begünstigt eine höhere Prozesstemperatur bei höherem Energieeintrag die Verdunstung des Druckfluids. Es kommt demzufolge zu weniger Liquefaktion bei höherem Energieeintrag, resultierend in einer geringeren Dichte der Prüfkörper.

Als vierter signifikanter Faktor beeinflusst die Zykluszeit die Dichte der Prüfkörper. Gleichung 25 gibt den ermittelten Zusammenhang an.

$$\rho^{S*} = f(t_Z^*) = f(x_4) = -0,01078 \cdot x_4 + 1,011 \quad (25)$$

Die Verlängerung der Zykluszeit resultiert in einer geringen, aber dennoch signifikanten Verringerung der Dichte. Hier hat die Quellungsreaktion des Wasserglases pro Schicht 120 s mehr

Zeit vonstattenzugehen. Die geringere Prozesstemperatur, die bei Verlängerung der Zykluszeit festgestellt werden konnte, wirkt diesem Effekt entgegen. Hieraus folgt die sehr geringe Abhängigkeit.

6.2.3 Permeabilität

Die Permeabilität K^S der hergestellten Prüfkörper wird von den Hauptfaktoren Binderkonzentration c_B und Fluideintrag E_F signifikant beeinflusst. Die grafische Darstellung der normierten, signifikanten Abhängigkeiten erfolgt in Abbildung 6.6.

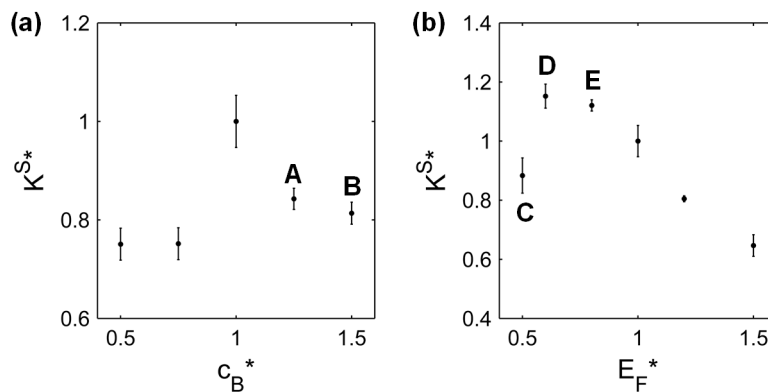


Abbildung 6.6: Abhängigkeit der normierten Permeabilität K^S von der normierten Binderkonzentration c_B^* (a) und dem normierten Fluideintrag E_F^* (b). Die mit A - E gekennzeichneten Bereiche haben ein Verhältnis von Fluideintrag zu Binderkonzentration von kleiner als 1.

Für beide Faktoren kann auf Grundlage der Messdaten keine Regression ermittelt werden, die die Abhängigkeiten über alle untersuchten Faktorstufen beschreibt. Im Falle der Binderkonzentration liegt das Maximum bei c_B^* gleich 1 (Referenzeinstellung). Im Falle des Fluideintrags wird die höchste Permeabilität bei einem normierten Fluideintrag E_F^* von 0,6 erreicht.

Das Verhalten der Permeabilität kann teilweise über die in Abschnitt 6.2.2 beschriebene Abhängigkeit der Dichte von den Faktoren c_B und E_F erklärt werden. Engelhardt und Pitter (1951) stellen einen linearen Zusammenhang zwischen der Permeabilität und der Porosität (entspricht der inversen Dichte) für lose Sande her. Demnach besitzt eine Sandschüttung geringerer Dichte stets eine höhere Permeabilität als eine Schüttung höherer Dichte. Dieser lineare Zusammenhang kann für weite Bereiche der aus allen Faktorvariationen gewonnenen Messdaten von Permeabilität und Dichte beobachtet werden. Dies veranschaulicht Abbildung 6.7.

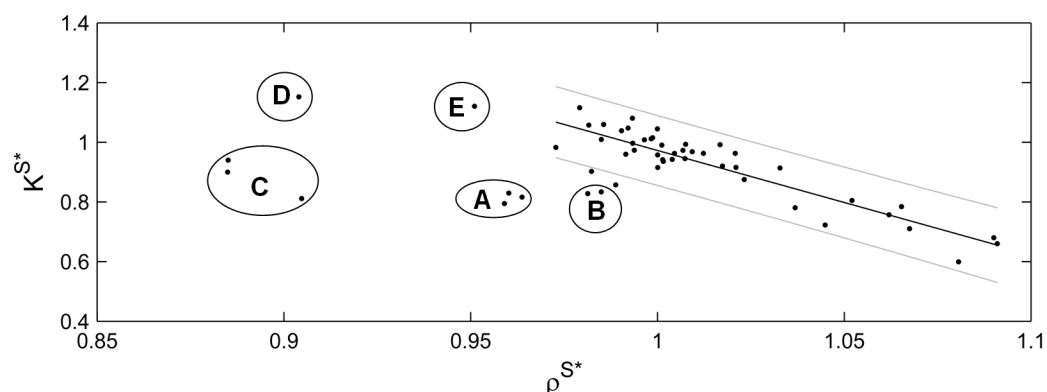


Abbildung 6.7: Auftragung der normierten Permeabilität K^{S*} über der normierten Dichte ρ^{S*} von allen Faktorvariationen. Die mit A - E markierten Datenpunkte entsprechen denen in Abbildung 6.6. Die Regression erfolgt über die übrigen Datenpunkte.

Die in der Abbildung mit A und B gekennzeichneten Daten stammen von Jobs mit Binderkonzentrationen von 15% bzw. 12,5%. Die mit C, D und E markierten Datenpunkte entsprechen Jobs, bei denen mit einem Fluideintrag von 5%, 6% und 8% gearbeitet wurde. Alle gekennzeichneten Bereiche haben gemeinsam, dass das Verhältnis von Fluideintrag zu Binderkonzentration kleiner als 1 ist. Für alle übrigen Bereich gilt

$$\frac{E_F}{c_B} \geq 1 \quad (26)$$

Trifft diese Bedingung zu, kann eine lineare Regression durchgeführt werden. Mit diesem Zusammenhang lässt sich aus der normierten Dichte ρ^{S*} eine normierte, berechnete Permeabilität $K_{ber.}^{S*}$ ableiten.

$$K_{ber.}^{S*} = f(\rho^{S*}) = -3,487 \cdot \rho^{S*} + 4,459 \quad (27)$$

Mithilfe dieses Zusammenhangs kann aus den bekannten, normierten Dichten der Faktorenvariationen von c_B^* und E_F^* (vgl. Abbildung 6.5 (a) und (b)) eine normierte Permeabilität $K_{ber.}^{S*}$ berechnet werden. Abbildung 6.8 stellt die gemessenen Permeabilitäten K^{S*} (analog zu Abbildung 6.6) und die mittels Formel 27 berechneten Permeabilitäten gegenüber.

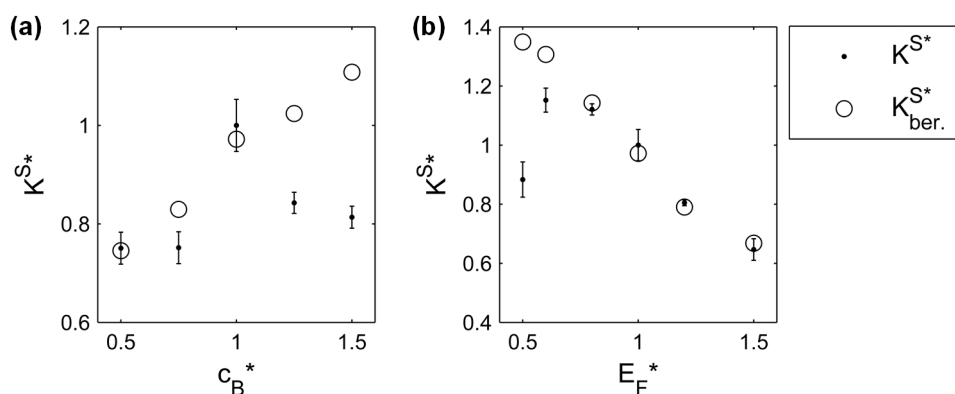


Abbildung 6.8: Auftragung der normierten Permeabilität K^{S*} und der normierten, berechneten Permeabilität $K_{ber.}^{S*}$ über der normierten Binderkonzentration c_B^* (a) und dem normierten Fluideintrag E_F^* (b)

Im Falle der Binderkonzentration kann für c_B^* -Werte von 0,5 und 1 die Permeabilität aus der Dichte mit guter Übereinstimmung vorhergesagt werden. Bei einer normierten Binderkonzentration von 0,75 ist anzunehmen, dass die Messung den wahren Wert unterschätzt. Für normierte Binderkonzentrationen von 1,25 und 1,5 tritt in der Messung eine deutlich geringere Permeabilität auf, als aus der Dichte der entsprechenden Prüfkörper berechnet werden konnte. Für die Abhängigkeit der berechneten Permeabilität vom normierten Fluideintrag gilt ein ähnlicher Zusammenhang: Bei geringen normierten Fluideinträgen von 0,5 und 0,6 werden wesentlich höhere Permeabilitäten berechnet als im Experiment gemessen werden konnten. Die übrigen gemessenen und berechneten Permeabilitäten in Abhängigkeit des normierten Fluideintrags stehen in guter Übereinstimmung.

Das Verhalten der Permeabilitäten in den Bereichen in denen das Verhältnis von Fluideintrag zu Binderkonzentration kleiner als 1 ist, kann durch ungebundene, feine Binderpartikel erklärt werden. Reus und Ratke (2009) stellen eine Abhängigkeit der Permeabilität von der Menge an ungebundenen Partikeln in einem Sandkern fest. Demnach werden Hohlräume, die für eine hohe Permeabilität verantwortlich sind, von kleineren Partikeln, die von der Luftströmung mitgerissen werden, verschlossen. Dieser Effekt resultiert in einer verringerten Permeabilität. Die REM-Aufnahme eines Prüfkörpers, der mit 5% Fluideintrag hergestellt wurde (vgl. Abbildung 5.16 (a)), zeigt eine Vielzahl solcher kleiner, ungebundener Binderpartikel. Da dieser Effekt abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit ist, wird für weitergehende Untersuchungen die Verwendung eines Gasdurchlässigkeitsprüfgeräts empfohlen, welches unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten realisieren kann.

Es kann festgehalten werden, dass bei einem Verhältnis des Fluideintrags zur Binderkonzentration größer oder gleich 1, eine direkte Korrelation der Dichte mit der Permeabilität nach Gleichung 27 vorgenommen werden kann.

6.2.4 Festigkeit

Das Hauptergebnis Festigkeit σ_B^S hängt signifikant von den Faktoren Binderkonzentration c_B , Fluideintrag E_F , Energieeintrag E_E , Zeitspanne vor Trocknung t_{vT} und Zeitspanne nach Trocknung t_{nT} ab. Abbildung 6.9 veranschaulicht die Ergebnisse der Regressionsanalysen der normierten Werte.

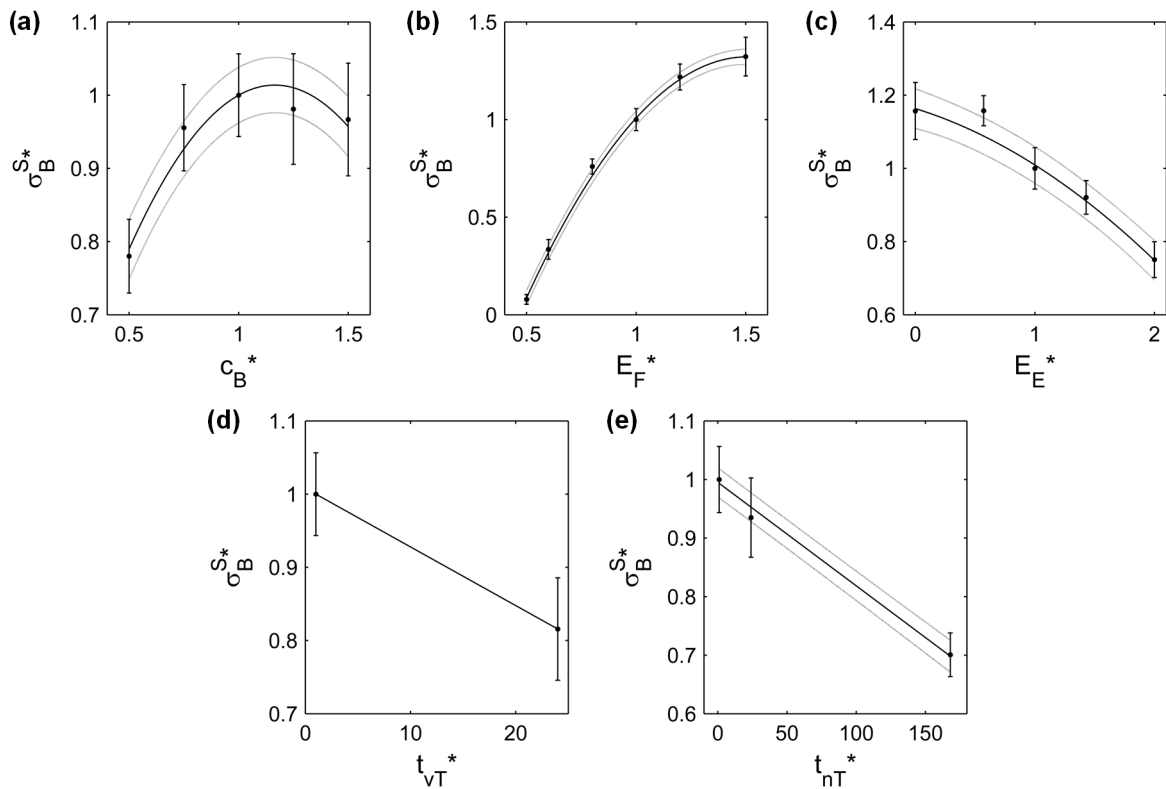


Abbildung 6.9: Regressionsanalyse für die Abhängigkeit der normierten Festigkeit σ_B^{S*} von der normierten Binderkonzentration c_B^* (a), dem normierten Fluideintrag E_F^* (b), dem normierten Energieeintrag E_E^* (c), der normierten Zeitspanne vor Trocknung t_{vT}^* (d) und der normierten Zeitspanne nach Trocknung t_{nT}^* (e)

Der Zusammenhang zwischen Festigkeit und Binderkonzentration kann durch das folgende quadratische Polynom mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9631 angenähert werden.

$$\sigma_B^{S*} = f(c_B^*) = f(x_1) = -0,5064 \cdot x_1^2 + 1,118 \cdot x_1 - 0,3262 \quad (28)$$

Das Festigkeitsmaximum tritt bei einer normierten Binderkonzentration von 1 (Referenzbedingungen) auf. Wird der Bindergehalt im SBS reduziert, steht weniger Wasserglas für die Ausbildung von Binderbrücken zwischen den Sandkörnern zur Verfügung. Dies resultiert in der Abnahme der Festigkeit. Wird der normierte Bindergehalt auf über 1 erhöht, so tritt ebenfalls eine Abnahme der Festigkeit auf. In diesem Fall ist das Formstoffsystem mit Binder übersättigt. Dies hat zur Folge, dass die größere Menge an Binder zwar angelöst wird, jedoch keine voll tragfähigen Binderbrücken zwischen den Sandkörnern ausbilden kann. Bei einem normierten Bindergehalt über 1 könnte eine weitere Steigerung der Festigkeit durch eine gleichzeitige Erhöhung des Fluideintrags realisiert werden. Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen ist es daher sinnvoll, die Faktoren Fluideintrag und Bindergehalt unter Einhaltung eines Verhältnisses von 1 zu 1 gemeinsam zu variieren. So kann sichergestellt werden, dass der im SBS vorhandene Binder vollständig durch die äquivalente Menge an Fluid aktiviert wird.

Die Abhängigkeit der Festigkeit von dem Fluideintrag lässt sich ebenfalls durch ein Polynom zweiten Grades annähern.

$$\sigma_B^{S*} = f(E_F^*) = f(x_2) = -1,215 \cdot x_2^2 + 3,665 \cdot x_2 - 1,442 \quad (29)$$

Diese Regression hat ein Bestimmtheitsmaß von 0,9989. Ausgehend von einem geringen Fluideintrag steigt die Festigkeit mit zunehmendem Fluideintrag zunächst stark an. Dieser Anstieg flacht ab einem normierten Eintrag von 1 deutlich ab und nähert sich schließlich einem Maximum bei 1,5. Dieses Verhalten lässt sich analog zu dem Verhalten der Binderkonzentration erklären. Wird dem System zu wenig Fluid zur Verfügung gestellt, kann das Bindersystem nur unvollständig aktiviert werden. Mit zunehmendem Fluideintrag wird immer mehr Binder aktiviert, der Brücken zwischen den Partikeln ausbilden kann. Bei einer starken Übersättigung des Systems mit Fluid kann kein zusätzlicher Festigkeitsgewinn durch eine weitere Steigerung des Fluideintrags erreicht werden. Ist der Binder durch einen großen Fluidüberschuss vollständig aktiviert, so übersteigt seine Festigkeit die der Sandkörner. Dies kann anhand der REM-Analysen (vgl. Abbildung 5.16) eindeutig belegt werden. Mit steigendem Fluideintrag findet ein Übergang von einem Binderbrückenversagen zu einem Sandkornversagen statt. Die Tatsache, dass der Bruch der Quarzkörner auf die Rissausbreitung bei der mechanischen Prüfung zurückzuführen ist, kann mithilfe der EDX Analysen der Bruchfläche (vgl. Abbildung 5.13) belegt werden. Das Element Natrium, Bestandteil des verwendeten Natriumwasserglasbinders, konnte sowohl auf den Binderbrücken als auch auf den Sandkornoberflächen detektiert werden. Auf den Bruchflächen, die ein Quarzkorn schneiden, ist kein Natrium nachweisbar. Damit kann eine Entstehung der Bruchfläche aufgrund einer Vorschädigung des Sandkorns (z.B. beim Mischvorgang) ausgeschlossen werden. In diesem Fall wäre sonst die Bruchfläche, analog zur Oberfläche des Sandkorns, mit Natriumwasserglas benetzt worden.

Mit zunehmendem Energieeintrag ist eine Abnahme der Festigkeit zu verzeichnen. Dieses Verhalten lässt sich mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9805 mit dem folgenden Polynom zweiten Grades beschreiben.

$$\sigma_B^{S*} = f(E_E^*) = f(x_3) = -0,0531 \cdot x_3^2 - 0,1011 \cdot x_3 + 1,163 \quad (30)$$

Der Eintrag von Energie in Form von Wärme bewirkt einen Entzug von Wasser aus dem gelösten Wasserglas. Hierdurch wird bereits während des In-Prozesses ein Teil der Aushärtung der Binderbrücken angestoßen. Die vollständige Härtung geschieht während des Trocknens in der Klimakammer. Die höhere Temperatur des Baufelds beschleunigt jedoch auch die Verdunstung des Druckfluids noch bevor es den Binder aktivieren kann. Läuft der Druckprozess also bei höheren Temperaturen ab, so kommt dies einer effektiven Reduktion des Fluideintrags gleich. Die genauere Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Fluid- und Energieeintrag bietet großes Potential für die gezielte Einstellung der Bauteileigenschaften und sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Im Rahmen des Post-Prozesses konnte eine signifikante Abhängigkeit der Festigkeit von der Zeitspanne vor Trocknung t_{vT} und Zeitspanne nach Trocknung t_{nT} festgestellt werden. Auf Basis der Versuchsdaten (2 Stufen) kann für t_{vT}^* folgender Zusammenhang abgeleitet werden.

$$\sigma_B^{S*} = f(t_{vT}^*) = f(x_5) = -0,008013 \cdot x_5 + 1,008 \quad (31)$$

Mit zunehmender Lagerzeit vor der Trocknung kommt es zu einem Festigkeitsverlust. Dieses Phänomen kann auf die Ausbildung von Natriumkarbonatnadeln an den Binderbrücken zurückgeführt werden. Jelinek und Polzin (2003) beschreiben den festigkeitsmindernden Effekt dieser Natriumkarbonatnadeln im Rahmen des Wasserglas-CO₂-Verfahrens. Die REM und EDX Ergebnisse (vgl. Abschnitt 5.2.5) zeigen vergleichbare Strukturen auf den Binderbrücken. Ausschließlich Prüfkörper, die 24 Stunden vor der Trocknung gelagert wurden, zeigten diese Nadeln. Daher kann angenommen werden, dass bei ausreichender Zeit der CO₂-Gehalt der Luft genügt, um die Ausbildung von festigkeitsmindernden Natriumkarbonatnadeln auszulösen. Die Bildung dieser Nadeln könnte ebenfalls durch die Anwesenheit von Kohlenstoff (in Form von Graphitpulver im SBS) begünstigt werden.

In Bezug auf die Lagerung der Prüfkörper nach der Trocknung lässt sich ebenfalls ein Abfall mit zunehmender Lagerzeit feststellen. Die Abhängigkeit kann durch folgendes Polynom ersten Grades beschrieben werden.

$$\sigma_B^{S*} = f(t_{nT}^*) = f(x_7) = -0,001767 \cdot x_5 + 0,9952 \quad (32)$$

Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,9933. Durch die hydrophilen Eigenschaften des anorganischen Binders ist nach Flemming und Tilch (1993, S. 331) von einer Wasseraufnahme der Prüfkörper bei den Lagerbedingungen im Sandlabor (vgl. Abbildung 6.3) auszugehen. Dies bestätigen die Ergebnisse der Untersuchungen des Feuchtegehalts der Prüfkörper (vgl. Abschnitt 5.25 (d)). Sowohl Wallenhorst et al. (2010) als auch Löchte und Boehm (2005) stellen einen Festigkeitsverlust bei der Lagerung anorganisch gebundener Kerne fest. Sie begründen den Festigkeitsverlust mit der Aufnahme von Wasser aus der Umgebung. Sie beschreiben in ihren Untersuchungen ebenfalls eine starke Abhängigkeit des Festigkeitsverlustes von der relativen Luftfeuchtigkeit. Daher ist es im Rahmen zukünftiger Untersuchungen sinnvoll die Abnahme der Festigkeit bei exakt geregelten klimatischen Bedingungen für das vorliegende Formstoffsystem zu untersuchen.

Die Dauer der Trocknung t_T hat besonders in den ersten 30 Minuten einen großen Einfluss auf die Festigkeit (vgl. Abbildung 5.24). Aufgrund der starken Streuung der Messwerte wurden diese Ergebnisse im Rahmen der Signifikanzanalyse jedoch ausgeschlossen und werden daher nicht weiter betrachtet.

6.2.5 Feuchtegehalt

Aus der Signifikanzanalyse geht hervor, dass der Feuchtegehalt ausschließlich von den Faktoren des Pre- und Post-Prozesses beeinflusst wird. Die Abhängigkeiten von den normierten Faktoren Binderkonzentration c_B^* , Trocknungsdauer t_T^* , Zeitspanne nach Trocknung t_{nT}^* und Trocknungstemperatur T_T^* zeigt Abbildung 6.10:

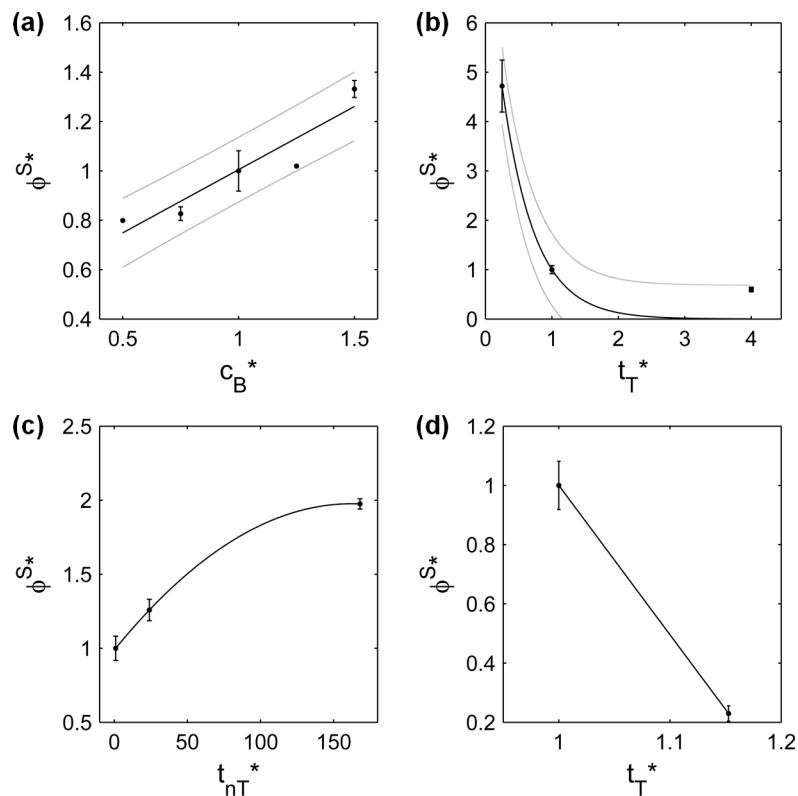


Abbildung 6.10: Regressionsanalyse für die Abhängigkeit des normierten Feuchtegehalts ϕ^{S*} von der normierten Binderkonzentration c_B^* (a), sowie der normierten Trocknungsdauer t_T^* (b), Zeitspanne nach Trocknung t_{nT}^* (c) und Trocknungstemperatur T_T^* (d)

Die Abhängigkeit der Probenfeuchte von der Binderkonzentration lässt sich mit dem folgenden linearen Polynom nähern (Bestimmtheitsmaß: 0,8953).

$$\phi^{S*} = f(c_B^*) = f(x_1) = 0,5118 \cdot x_1 + 0,4933 \quad (33)$$

Mit zunehmendem Bindergehalt kommt es zu einem Anstieg der Probenfeuchte. Die Tatsache, dass sich Wasser aus der Umgebung vornehmlich an den Binder anlagert, konnte bereits bei der Untersuchung des Ausgangsmaterials festgestellt werden (vgl. Abbildung 6.1 (b)). Dies lässt den Schluss zu, dass der lineare Anstieg der Probenfeuchte auf die lineare Steigerung des Bindergehalts zurückzuführen ist.

Die Abhängigkeit der Probenfeuchte von der normierten Trocknungszeit t_T^* kann durch die nachfolgende Exponentialfunktion angenähert werden.

$$\phi^{S*} = f(t_T^*) = f(x_6) = 7,907 \cdot \exp(-2,065 \cdot x_6) \quad (34)$$

R^2 beträgt hier 0,9691. Die exponentielle Näherung basiert auf der Annahme der instationären Wärmeleitung innerhalb der Prüfkörper. Bei der Berechnung der Temperatur in Abhängigkeit der Zeit geht jene in Form eines Exponenten ein (Wagner 1998, S. 33). Je länger die Trocknung der Proben andauert, desto weniger Feuchtigkeit kann bei der anschließenden Bestimmung der Probenfeuchte gemessen werden. Über erzwungene Konvektion (Gebläse in der Klimakammer) findet der Wärmeübergang von der 120°C warmen Luft innerhalb der Klimakammer

auf die Proben statt. Über instationäre Wärmeleitung dringt die Wärme, die für die Trocknung der Proben verantwortlich ist, vom Probenrand in das Probeninnere vor. Die Näherung würde vorhersagen, dass ab einer Trocknung von ca. 2,5 Stunden keine Restfeuchte innerhalb der Probekörper vorhanden sein sollte. Dennoch werden nach vier Stunden Trocknung Feuchtegehalte von ca. 0,2% gemessen. Dieser Umstand kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen findet die Bestimmung des Feuchtegehalts nicht unmittelbar nach der Trocknung statt. Da sie als letztes bei der Quantifizierung der Qualitätsmerkmale stattfindet, können die Prüfkörper während dem Verlauf der anderen Prüfungen Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen. Zum anderen bleibt bei einer Trocknungstemperatur von 120°C Restwasser in dem Natriumsilikatbinder zurück (Polzin 2012, S. 67). Demnach verdunstet ab 105°C zunächst freies Wasser. Erst bei ca. 200°C kann das absorbierte Wasser (Wassermoleküle, die durch Wasserstoffbrücken an Silanolgruppen gebunden sind) entfernt werden.

Die zuvor beschriebene Aufnahme von Wasser aus der Umgebung spiegelt sich in der Abhängigkeit des Feuchtegehalts von der Lagerdauer t_{nT} wider. Normiert kann die Abhängigkeit durch ein Polynom zweiten Grades beschrieben werden.

$$\phi^{S*} = f(t_{nT}^*) = f(x_7) = -3,751e^{-5} \cdot x_7^2 + 0,01218 \cdot x_7 + 0,9879 \quad (35)$$

Ausgehend von der Referenzbedingung (Lagerung ca. 1 Stunde) nimmt der Feuchtegehalt nach 24 Stunden bereits um ca. 20% zu. Nach einer Lagerung von einer Woche kommt es zur Verdopplung des Feuchtegehalts. Absolut erreichen die Proben einen Feuchtegehalt von ca. 0,7%. Dies ist vergleichbar mit der Feuchte des Ausgangsmaterials (vgl. Abbildung 6.1). Daher ist von einer Sättigung auszugehen.

Die von Polzin (2012, S. 67) beschriebene Abhängigkeit des Restwasseranteils im Binder von der Trocknungstemperatur zeigt sich deutlich bei der Variation der Trocknungstemperatur. Auf Basis der beiden untersuchten Stufen kann ein linearer Zusammenhang abgeleitet werden.

$$\phi^{S*} = f(T_T^*) = f(x_8) = -5,046 \cdot x_8 + 6,046 \quad (36)$$

Eine Steigerung der Temperatur um 60 K (von 120°C auf 180°C) bewirkt eine Abnahme des Feuchtegehalts um nahezu 80%, bezogen auf den Referenzzustand. Die Erklärung hierfür besteht in der zuvor bereits genannten Abspaltung des absorbierten Wassers im Temperaturbereich zwischen 105°C und 200°C.

6.2.6 Prozesstemperatur der Ringprüfkörper

Die Prozesstemperatur der Ringprüfkörper verhält sich nahezu identisch zu jener der Scheibenprüfkörper. Signifikante Abhängigkeiten bestehen von dem Energieeintrag und der Zykluszeit. Abbildung 6.11 zeigt diese Zusammenhänge für die normierten Größen auf.

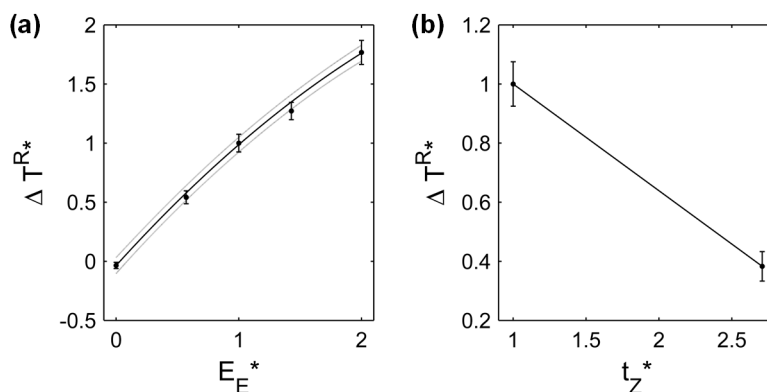


Abbildung 6.11: Regressionsanalyse für die Abhängigkeit der normierten Prozesstemperatur der Ringprüfkörper ΔT_R^* von dem normierten Energieeintrag E_E^* (a) und der normierten Zykluszeit t_Z^* (b)

Die mathematische Beschreibung der Zusammenhänge erfolgt in den Gleichungen 37 und 38:

$$\Delta T^{R*} = f(E_E^*) = f(x_3) = -0,124 \cdot x_3^2 + 1,146 \cdot x_3 - 0,03565 \quad (37)$$

$$\Delta T^{R*} = f(t_Z^*) = f(x_4) = -0,3612 \cdot x_4 + 1,361 \quad (38)$$

Das für die Abhängigkeit des normierten Energieeintrags E_E^* angenäherte Polynom besitzt ein Bestimmtheitsmaß von 0,9983. Für die Begründung der Abhängigkeiten sei auf die Diskussion der Ergebnisse der Scheibenprüfkörper (Abschnitt 6.2.1) verwiesen.

6.2.7 Curlneigung

Das einmalige Auftreten von Curl bei einer Binderkonzentration von 7,5% (vgl. Abbildung 5.11) kann auf ein zufälliges Ereignis zurückgeführt werden. Eine lokale Verschmutzung der Beschichter Klinge könnte in diesem Einzelfall zu einer Verschiebung der Schichten geführt haben. Eine signifikante Abhängigkeit von Curl lässt sich ausschließlich von der eingetragenen Energie feststellen. Abbildung 6.12 zeigt den Zusammenhang, der mit einem Polynom zweiten Grades beschrieben werden kann.

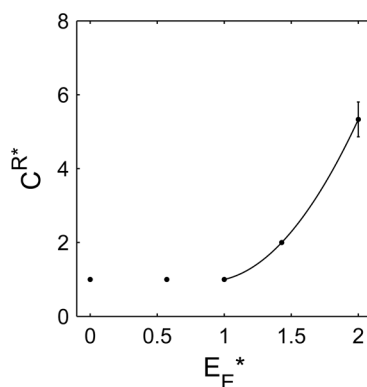


Abbildung 6.12: Quadratisches Polynom für Abhängigkeit der normierten Curlneigung C_R^* von dem normierten Energieeintrag E_E^*

Da Curl unterhalb der Referenzbedingungen nicht auftritt, gilt der Zusammenhang nur für normierte Energieeinträge E_E^* von 1 oder größer. Er wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$C^{R*} = f(E_E^*) = f(x_3) = 3,5 \cdot x_3^2 - 6,167 \cdot x_3 + 3,667 \quad (39)$$

Curl tritt erst ab einer bestimmten Menge an eingetragener Energie auf. Unterhalb dieser Schwelle konnte in keinen Versuchsreihen Curl beobachtet werden. Daher kann angenommen werden, dass es sich hierbei um einen rein thermisch induzierten Effekt handelt. Wird eine gewisse Schwelle an Energieeintrag überschritten, so nimmt die Gefahr von Curl drastisch zu. Die Ursache des steilen Anstiegs liegt in der Natur des Schichtbauprozesses. Kommt es während des Prozesses zu einem Aufwölben der bedruckten Flächen über die Schichtdicke hinaus, so reißt der Beschichter beim anschließenden Materialauftrag die zuvor bedruckte Fläche mit sich. Im Idealfall gibt es also eine scharfe Grenze beim Auftreten von Curl. Es ist anzunehmen, dass es bei jedem thermisch unterstützten 3-D-Druckprozess aufgrund unvermeidlicher Temperaturgradienten zwischen bedruckten und unbedruckten Flächen zu thermischen Verzugerscheinungen kommt. In VDI (2015) wird für den Lasersinterprozess von Kunststoffen vorgeschlagen, dem Curl Effekt durch eine vorteilhafte Positionierung der Teile im Bauraum entgegenzuwirken. Hierbei soll die Belichtung großer Bauteilflächen in einer Schicht vermieden werden. Ebenfalls kann durch das Einbringen von Stützkonstruktionen Abhilfe geschaffen werden. Beide Maßnahmen könnten für das thermisch unterstützte 3-D-Drucken ebenfalls eine Möglichkeit darstellen die Gefahr von Curl zu reduzieren.

6.2.8 Fluidmigration

Die Ausprägung von Fluidmigration an den hergestellten Prüfkörpern hängt signifikant von den Faktoren Binderkonzentration c_B , Fluideintrag E_F und Energieeintrag E_E ab. Abbildung 6.13 stellt die Zusammenhänge für die normierten Größen mit ihren jeweiligen Regressionen dar.

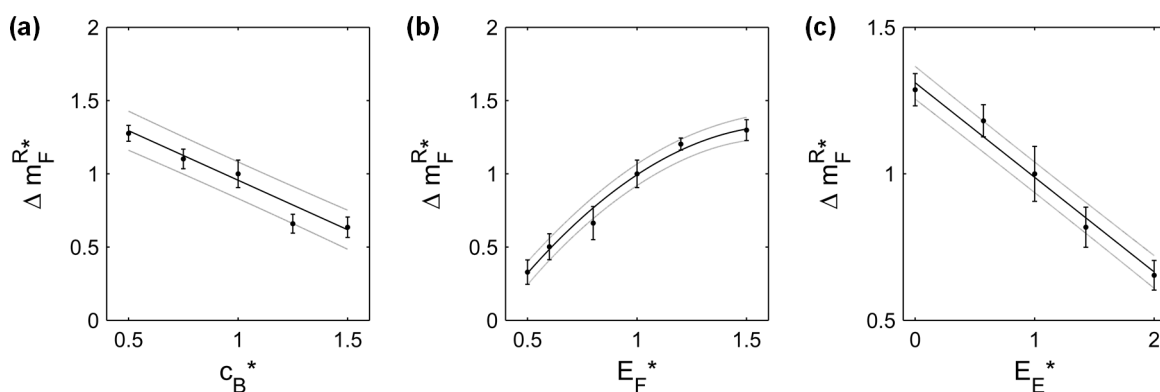


Abbildung 6.13: Regressionsanalyse für die Abhängigkeit der normierten Fluidmigration Δm_F^{R*} von der normierten Binderkonzentration c_B^* (a), dem normierten Fluideintrag E_F^* (b), dem normierten Energieeintrag E_E^* (c)

Mit steigendem Bindergehalt ist ein Rückgang der Fluidmigration zu verzeichnen. Dieses Verhalten kann durch folgendes Polynom ersten Grades mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9424 angenähert werden:

$$\Delta m_F^{R*} = f(c_B^*) = f(x_1) = -0,6759 \cdot x_1 + 1,632 \quad (40)$$

Je mehr Binder in dem Formstoffsystem enthalten ist, desto mehr Binder wird von dem eingetragenen Fluid aufgelöst. Aufgrund der stark hygroskopischen Eigenschaften des Wasserglaspulvers geht das Fluid unmittelbar nachdem es in das SBS eingetragen wurde eine Reaktion mit dem Binder ein. Es kommt zur Auflösung der Partikel und Bildung einer viskosen, kolloiden Lösung. Je höher die Konzentration des Binders im SBS ist, desto höher ist auch der Feststoffgehalt in der sich ausbildenden Wasserglaslösung (vgl. Abschnitt 2.1.2). Mit zunehmendem Feststoffgehalt steigt im allgemeinen die Viskosität von kolloiden Lösungen an (Tropea et al. 2007, S. 690). Dies führt zu einem absinken die Beweglichkeit der Lösung. Diese verringerte Beweglichkeit äußert sich in einer Abnahme der Fluidmigration.

Zwischen der Fluidmigration und dem Fluideintrag lässt sich im untersuchten Bereich ein Zusammenhang beobachten, der mit einem Polynom zweiten Grades beschrieben werden kann. Dessen Gleichung lautet:

$$\Delta m_F^{R*} = f(E_F^*) = f(x_2) = -0,7174 \cdot x_2^2 + 2,419 \cdot x_2 - 0,7083 \quad (41)$$

Die Regression besitzt ein Bestimmtheitsmaß von 0,9926. Im Bereich von einem normierten Fluideintrag von 1 oder kleiner, ist das Verhalten nahezu linear und kann auf die gleiche Weise wie zuvor die Abhängigkeit der Fluidmigration von der Binderkonzentration erklärt werden. Je kleiner das Verhältnis von Fluid zu Binder ist, desto höher ist die Viskosität der sich ausbildenden kolloiden Lösung. Daraus folgt eine Abnahme der Fluidmigration mit abnehmendem Fluideintrag. Im Extremfall von sehr geringem Fluideintrag ($E_F^* = 0,5$) ist nicht genügend Fluid vorhanden, um überhaupt den vorhandenen Binder vollständig aufzulösen (vgl. REM-Abbildung 5.16). Für normierte Fluideinträge von mehr als 1 zeichnet sich eine Sättigung der Fluidmigration ab. Aufgrund der Geometrie der Ringprüfkörper tritt Fluidmigration bevorzugt in den Stegzwischenräumen auf. Hierbei wandert die Flüssigkeit von den Stegen zu den Mittelpunkten der Stegzwischenräume hin. Sobald der Bereich in der Mitte zwischen zwei Stegen genügend Flüssigkeit enthält, um Brücken auszubilden, haftet sämtliches Partikelmaterial im Stegzwischenraum an. Weiteres Fluid wird als Kapillarflüssigkeit (vgl. Abbildung 2.12) aufgenommen und führt zu keiner weiteren Fluidmigration in diesem Bereich, woraus eine Sättigung resultiert.

Die Abhängigkeit der Fluidmigration vom Energieeintrag lässt sich mit der folgenden linearen Regression beschreiben (Bestimmtheitsmaß: 0,9894):

$$\Delta m_F^{R*} = f(E_E^*) = f(x_3) = -0,3228 \cdot x_3 + 1,311 \quad (42)$$

Je mehr Energie in das System eingetragen wird, desto geringer ist die Ausprägung der Fluidmigration. Die eingetragene Energie erwärmt die zuvor bedruckte SBS-Schicht. Hierdurch wird ihr zum einen ein Teil des eingetragenen Wassers unmittelbar wieder entzogen, was einer Reduktion des Fluideintrags gleichkommt (vgl. Abschnitt 6.2.4). Zum anderen löst die eingebrachte Wärme die physikalische Trocknung der Wasserglaslösung aus. Die Viskosität der Lösung

erhöht sich aufgrund des Wasserentzugs. Aus der Steigerung der Viskosität folgt ebenfalls, wie zuvor beschrieben, eine Reduktion der Fluidmigration.

6.2.9 Abrieb

Eine signifikante Abhängigkeit des Abriebs konnte ausschließlich von dem Faktor Fluideintrag festgestellt werden. In Abbildung 6.14 ist der normierte Abrieb Δm_A^{R*} über dem normierten Fluideintrag E_F^* , sowie die Regression auf Basis einer Exponentialfunktion aufgetragen.

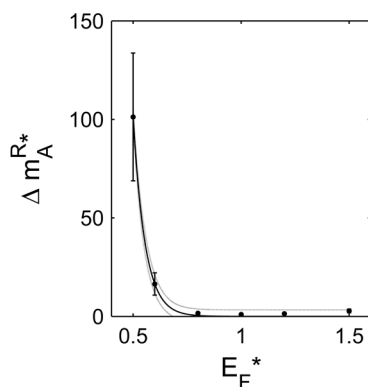


Abbildung 6.14: Regressionsanalyse für die Abhängigkeit des normierten Abriebs Δm_A^{R*} von dem normierten Fluideintrag E_F^*

Der Zusammenhang kann mithilfe der Gleichung 43 beschrieben werden (Bestimmtheitsmaß 0,9986):

$$\Delta m_A^{R*} = f(E_F^*) = f(x_2) = 8.656 \cdot 10^5 \cdot \exp(-18,11 \cdot x_2) \quad (43)$$

Ab einem normierten Fluideintrag von 0,8 oder mehr wird der auftretende Abrieb sehr gering. Die gebildeten Binderbrücken sind an den Stirnseiten der Stege stabil genug, um der mechanischen Beanspruchung bei der Abriebprüfung größtenteils zu widerstehen. Unterhalb eines normierten Fluideintrags von 0,8 kommt es zum exponentiellen Anstieg des Abriebs. Hier reicht die Festigkeit der filigranen Stege nicht aus, um den Belastungen der Abriebprüfung standzuhalten. Die Abhängigkeit des Abriebs von dem Fluideintrag ist eng mit der Abhängigkeit der Festigkeit vom Fluideintrag verknüpft (vgl. Abschnitt 6.2.4). Es kann festgehalten werden, dass es unterhalb einer normierten Festigkeit von ca. 0,35 zu einem drastischen Anstieg des Abriebs kommt.

6.3 Diskussion der ergänzenden Versuchsreihen

Nachdem der vorhergehende Abschnitt sich ausschließlich auf die, aus der Faktorvariation gewonnenen Ergebnisse bezieht, erfolgt in diesem Unterkapitel die Diskussion der Ergebnisse der ergänzenden Versuchsreihen.

6.3.1 Einfluss der y-Druckrichtung

In Abschnitt 5.3.1 wurde der Einfluss der y-Druckrichtung auf den Druckprozess bzw. die Prüfkörpereigenschaften anhand des Qualitätsmerkmals Fluidmigration dargestellt. Die Versuchs-

reihe zeigt, dass die Fluidmigration mit einem größer werdenden Zeitintervall zwischen dem Auflegen und dem Bedrucken einer Schicht abnimmt. Dieser Effekt kann durch die Hygroskopie der aufgelegten Schicht erklärt werden. Je länger unbedrucktes Material auf der zuvor bedruckten Fläche liegt, desto mehr Wasser kann dieses Material aus der unteren Schicht aufnehmen. Es findet Fluidmigration entgegengesetzt der Schwerkraft statt. Flüssigkeit, die über diesen Weg migriert, steht für die Fluidmigration in andere Richtungen (die von dem Prüfkörper erfasst werden) nicht mehr zur Verfügung. Fluidmigration in entgegengesetzter Richtung zur Schwerkraft setzt das Vorhandensein von unbedrucktem Material in dieser Richtung voraus. Je länger es vorhanden ist, desto länger steht es für Fluidmigration zur Verfügung. Sobald der Druckkopf neues Fluid in den entsprechenden Bereich des Baufelds einträgt, kommt dieser Weg der Fluidmigration zum Erliegen.

Ein eindeutiger Beweis für diese These konnte im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen nicht erbracht werden. Da der Effekt jedoch in nahezu allen Versuchsreihen zu beobachten ist, wird eine genauere Untersuchung empfohlen. Zum Erlangen möglichst homogener Eigenschaften der hergestellten Teile in Bezug auf ihre Position im Baufeld, ist die Dauer der einzelnen Zyklusschritte zu beachten. Sie sollte derart eingestellt werden, dass die Dauer der einzelnen Schritte möglichst identisch ist und sie in gleicher Richtung ablaufen. Somit erfährt jedes Teil, unabhängig von seiner Position im Baufeld, gleichbleibende zeitliche Differenzen zwischen den einzelnen Schritten innerhalb eines Arbeitszyklus.

6.3.2 Untersuchung der Anisotropie in z-Richtung

Die Untersuchung der Anisotropie der Prozess- und Teileigenschaften in Bezug auf ihre Orientierung im Baufeld zeigt deutliche Richtungsabhängigkeiten auf (vgl. Abschnitt 5.3.2). Die höhere Prozesstemperatur der rotierten Scheiben- und Ringprüfkörper ist auf das Verhältnis von bedruckter zu unbedruckter Fläche im Baufeld zurückzuführen. Der Eintrag von Fluid führt zu einer deutlichen Absenkung der Oberflächentemperatur in den entsprechenden Bereichen des Baufelds (vgl. Abbildung 4.13). Die Rotation der Prüfkörper um ihre x- bzw. y-Achse bewirkt, dass die bedruckte Fläche pro Schicht deutlich geringer ist als im Ausgangszustand. Je kleiner die Fläche ist, die von dem Druckkopf bedruckt wird, desto rascher wird sie von dem umliegenden, unbedruckten und damit wärmerem Partikelmaterial erwärmt. Aus diesem Effekt folgt eine insgesamt höhere Prozesstemperatur.

Die Abnahme der Dichte bei den rotierten Prüfkörpern kann als Folge des höheren Energieeintrags pro bedruckter Fläche interpretiert werden. Im Rahmen der Faktorvariation konnte eine eindeutige Abhängigkeit der Dichte vom Energieeintrag festgestellt werden (vgl. Abschnitt 6.2.2). Werden die Prüfkörper liegend (also in xy-Orientierung) hergestellt, so setzen sie sich aus 42 bedruckten Schichten zusammen. Im Falle der stehenden Anordnung (xz- oder yz-Orientierung) bestehen sie aus 200 Schichten. Demzufolge wird auf die identische Menge an eingetragenen Fluid das ca. fünffache an Energie eingebracht. Dies resultiert in einer deutlich verringerten Dichte der Prüfkörper.

Im Vergleich zu den liegend hergestellten Proben weisen die rotierten Prüfkörper weniger als 50% der Festigkeit auf. Zum einen kann der zuvor beschriebene höhere effektive Energieeintrag hierfür verantwortlich gemacht werden. In Abschnitt 6.2.4 konnte gezeigt werden, dass die

Festigkeit mit steigendem Energieeintrag abnimmt. Zum anderen ist die Richtungsabhängigkeit der Festigkeit ein grundsätzliches Phänomen, welches bei nahezu allen additiven Fertigungsverfahren auftritt (Gebhardt 2014, S. 142). Die untersuchten Prüfkörper wurden mit Voxelkantenlängen von $27 \times 85 \times 250 \mu\text{m}$ ($dx \times dy \times dz$) hergestellt. Das eingetragene Fluid muss demzufolge $250 \mu\text{m}$ (Schichtdicke) in z-Richtung vordringen, bevor es eine Bindungsreaktion mit der darunterliegenden Schicht auslösen kann. Aus diesem Umstand resultieren die stark verringerten Festigkeiten der stehend hergestellten Prüfkörper.

6.3.3 Detektion von prozessbedingten Schwachstellen

Die Ergebnisse der beiden durchgeführten Versuchsreihen (vgl. Abschnitt 5.3.3) konnten die Eignung des Scheibentests für die Detektion von prozessbedingten Schwachstellen belegen. Bei Referenzprozessbedingungen können Fehlstellen sowohl unterschiedlicher Ausdehnungen und Positionen als auch verschiedener Orientierungen anhand des Bruchbilds der Proben nachgewiesen werden. Die geringste, nachweisbare Fehlergröße beträgt $0,25 \text{ mm}$, also die Dimension einer Schichtstärke. Es ist davon auszugehen, dass die Nachweisbarkeit eines Fehlers mit dieser Prüfmethode stark von den Herstellungsbedingungen der Probe abhängt. Tritt beispielsweise starke Fluidmigration auf, so können durch den Prozess eingebrachte Fehlstellen hierdurch verdeckt werden.

6.3.4 Qualitative Bewertung einer Realgeometrie

Mit der Herstellung der in Abschnitt 5.3.4 dargestellten Realgeometrie konnte gezeigt werden, dass sich das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte 3-D-Druckverfahren für die Herstellung eines industriell eingesetzten, anorganisch gebundenen Kerns eignet. Hier konnte an der Realgeometrie die Auswirkung von Curl exemplarisch gezeigt werden. Die Gefahr von Curl ist besonders groß in filigranen Bereichen, die in das ungebundene, warme Pulverbett gedruckt werden. Dies konnte bei der exemplarisch dargestellten Aufnahme des Kernlagers gezeigt werden. Die filigranen Bereiche trocknen verhältnismäßig rasch, wodurch es zu einem leichten Aufwölben kommt. Bei dem nächsten Beschichtungsvorgang kommt es zu einer leichten Verschiebung jener Bereiche. Da sich der Effekt über mehrere Schichten hinweg fortsetzt, kann eine deutliche Maßabweichung am fertig gebauten Kern festgestellt werden. Wie in Abschnitt 6.2.7 beschrieben, kann diesem Effekt prozesseitig oder konstruktiv entgegengewirkt werden.

6.4 Bedeutung für den industriellen Einsatz additiv hergestellter Formstoffe

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich eine Reihe von Handlungsempfehlungen für den Einsatz additiv hergestellter Formstoffe in Gießereiprozessen ableiten. Die folgenden Ausführungen beziehen sich dabei im Kern auf das im Rahmen der Arbeit untersuchte Formstoffsystem. Eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf additive Formstoffherstellungsverfahren, die nach einem ähnlichen Prinzip arbeiten, kann teilweise angenommen werden. Dies gilt beispielsweise bei der Verwendung eines andersartigen Formstoffsystems, welches ebenfalls schichtweise aufgetragen und über das Eintragen von Fluid mittels Druckkopf aktiviert wird.

Trifft ein Gießereibetrieb die Entscheidung additiv hergestellte Formstoffe in einem Gießprozess einzusetzen, können diese selbst hergestellt oder zugekauft werden. Eine eigene Her-

stellung erfordert eine Investition in eine entsprechende Anlage. Bei dieser betriebswirtschaftlichen Entscheidung sollten Gießereien das Potential der additiven Form- und Kernherstellung in Bezug auf ihr Teilespektrum bewerten. Dabei müssen beispielsweise Einsparpotentiale bei Werkzeug-, Kernmontage- und Lagerkosten sowie Wettbewerbsvorteile durch schnellere Lieferzeiten berücksichtigt werden (Lange 2014). Mit Blick auf die Homogenität und Reproduzierbarkeit des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten 3-D-Druckprozesses (vgl. Abschnitt 5.1) sollte die Verantwortlichkeit für die additive Formstoffherstellung bei hochqualifiziertem Fachpersonal liegen. Aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen, welche die Qualitätsmerkmale der gedruckten Formen und Kerne beeinflussen, erfordert der Betrieb der Anlage umfangreiches Prozesswissen. In Verbindung mit einer Qualitätssicherung der Teile kann ein erfolgreicher Einsatz dieser Technologie ermöglicht werden. Dieser vermeintliche Mehraufwand birgt den Vorteil, dass internes Prozesswissen über diese Technologie aufgebaut wird, wodurch sich eine Gießerei technologisch vom Wettbewerb absetzen kann.

Sollen generativ hergestellte Formen und Kerne eingesetzt werden, ohne dass eine Investition in einen eigenen 3-D-Drucker getätigt wird, so können die Formstoffe von externen Dienstleistern bezogen werden. Hier ist eine detaillierte Abstimmung zwischen Gießerei und Dienstleister notwendig, um qualitativ hochwertigen Guss zu gewährleisten. Die Gießerei muss die Anforderungen an den Formstoff, wie beispielsweise Festigkeit oder Permeabilität, möglichst exakt kennen und diese an den Dienstleister kommunizieren. Der Einsatz der im Rahmen der Arbeit beschriebenen Formstoffprüfverfahren (vgl. Abschnitt 4.4.4) hilft bei der Erstellung eines Lastenhefts sowie der Qualitätssicherung. Bei einem externen Bezug von gedruckten Formstoffen müssen Einflüsse der erhöhten Lagerzeit (vgl. Abschnitt 5.2.7) und Belastungen durch den Transport berücksichtigt werden.

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Faktorvariationen zeigen eine Reihe von Zielkonflikten und Prozessbesonderheiten auf, die in Abhängigkeit der Anforderungen eines Gießprozesses berücksichtigt werden müssen. Ein eindeutiger Zielkonflikt besteht zwischen den Qualitätsmerkmalen Permeabilität, Festigkeit und Fluidmigration. Im Allgemeinen muss für einen erfolgreichen Gießprozess eine ausreichend hohe Festigkeit und Permeabilität des Formstoffs bei gleichzeitig geringer Fluidmigration (entspricht einer hohen Maßhaltigkeit) sichergestellt sein. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Faktoren Binderkonzentration, Fluideintrag und Energieeintrag sowohl Festigkeit als auch Fluidmigration signifikant beeinflussen (vgl. Abschnitte 6.2.4 und 6.2.8). Die Permeabilität wird von der Binderkonzentration und dem Fluideintrag bestimmt (vgl. Abschnitt 6.2.3). Der Zielkonflikt stellt sich folgendermaßen dar:

- Eine Erhöhung des Fluideintrags wirkt sich positiv auf die Festigkeit und negativ auf die Fluidmigration aus.
- Eine Erhöhung des Energieeintrags beeinflusst die Festigkeit negativ und die Fluidmigration positiv.
- Eine Erhöhung der Binderkonzentration wirkt sich positiv auf Festigkeit und Fluidmigration aus, kann jedoch mit einer starken Verringerung der Permeabilität einhergehen.

Diese Erkenntnisse verdeutlichen die Notwendigkeit die Ansprüche an das Formstoffsystem möglichst exakt zu formulieren. Je genauer diese durch verlässliche Formstoffprüfverfahren beschrieben werden können, desto eher ist eine Abstimmung des additiven Herstellungsprozesses der Formen und Kerne auf das Anforderungsprofil eines Gießprozesses möglich.

Neben den Erkenntnissen aus der Faktorvariation können weitere Handlungsempfehlungen auf Basis der ergänzenden Versuchsreihen gegeben werden. Aufgrund der ausgeprägten Anisotropie der Formstoffeigenschaften in Bezug auf ihre Orientierung in der Jobbox (vgl. Abschnitt 6.3.2) ist eine Kenntnis der Lastverteilung in der Form bzw. im Kern von großem Vorteil. Aufgrund ihrer Lagerung in einer Kokille oder einem Kernpaket sind filigrane Kerne oftmals einer hohen Biegebeanspruchung in eine bestimmte Richtung ausgesetzt. Ist dies bekannt, so kann der Kern bei der additiven Herstellung entsprechend in der Jobbox ausgerichtet werden. Somit kann die Anisotropie des additiv hergestellten Kern kompensiert werden. Eine spezielle Form der Anisotropie tritt durch die, in den Abschnitten 5.3.3 und 6.3.3 beschriebenen, prozessbedingten Schwachstellen auf. Falls diese beim additiven Herstellungsprozess nicht vermieden werden können, müssen sie exakt lokalisiert und nach Möglichkeit außerhalb des bedruckten Bereichs oder in unkritische Form- oder Kernbereiche gelegt werden.

Die qualitative Bewertung der Realgeometrie (vgl. Abschnitte 5.3.4 und 6.3.4) zeigt, dass trotz der nahezu unbeschränkten konstruktiven Freiheit, die additive Fertigungsverfahren mit sich bringen, auch die Geometrie einer Form oder eines Kerns bei seiner Herstellung berücksichtigt werden muss. Die hier beschriebene, lokal auftretende Maßabweichung durch Curl könnte durch konstruktive Maßnahmen, veränderter Orientierung in der Jobbox oder angepasster Prozessführung begegnet werden.

Durch konsequente Investitions- und Innovationsbereitschaft können Gießereien die Herausforderungen der additiven Formstoffherstellung verstehen, bewältigen und das volle Potential dieser zukunftsweisenden Technologie ausschöpfen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

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 Fertigungsmethoden 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 Fertigungsmethoden 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.

Diese wissenschaftliche Arbeit 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 der Arbeit 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 Teileigenschaften innerhalb eines Bauprozesses als auch die Prozessreproduzierbarkeit stets im Fokus. Zusammenfassend lassen sich folgende zentrale Erkenntnisse festhalten:

- 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. Sowohl eine verlängerte Lagerung vor der Trocknung als auch eine erhöhte Lagerzeit nach der Trocknung wirken sich negativ auf die Festigkeit aus.
- Der Feuchtegehalt wird von den Faktoren des Post-Prozesses dominiert. Die Trocknungszeit und -temperatur sowie die Lagerzeit nach der Trocknung nehmen maßgeblichen Einfluss auf dieses Qualitätsmerkmal. Des Weiteren steigt der Feuchtegehalt mit steigender Binderkonzentration.
- 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.
- Im Rahmen der ergänzenden Versuchsreihen konnte die y-Druckrichtung als Einflussgröße auf die Prozess- und Prüfkörpereigenschaften identifiziert werden. Ebenfalls wurde die Anisotropie in z-Richtung quantifiziert und bestätigt, dass sich der Scheibentest für die Detektion prozessbedingter Schwachstellen eignet.

Sowohl die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaute Prozess- und Prüfmethodik als auch die aus der Faktorenvariation 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 Gießversuche mit anorganisch gebundenen, additiv hergestellten Formen und Kernen in einem konventionellen Gießverfahren (z.B. Schwerkraftkokillengießen) könnte das verfahrensspezifische Potential an einem Gussteil herausgearbeitet werden.

Durch weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den genannten Schwerpunktbereichen lassen sich noch bestehende Prozessunsicherheiten minimieren und die Qualität der hergestellten Formen und Kerne 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.

Anhang

Schaltplan NI-Steuerung

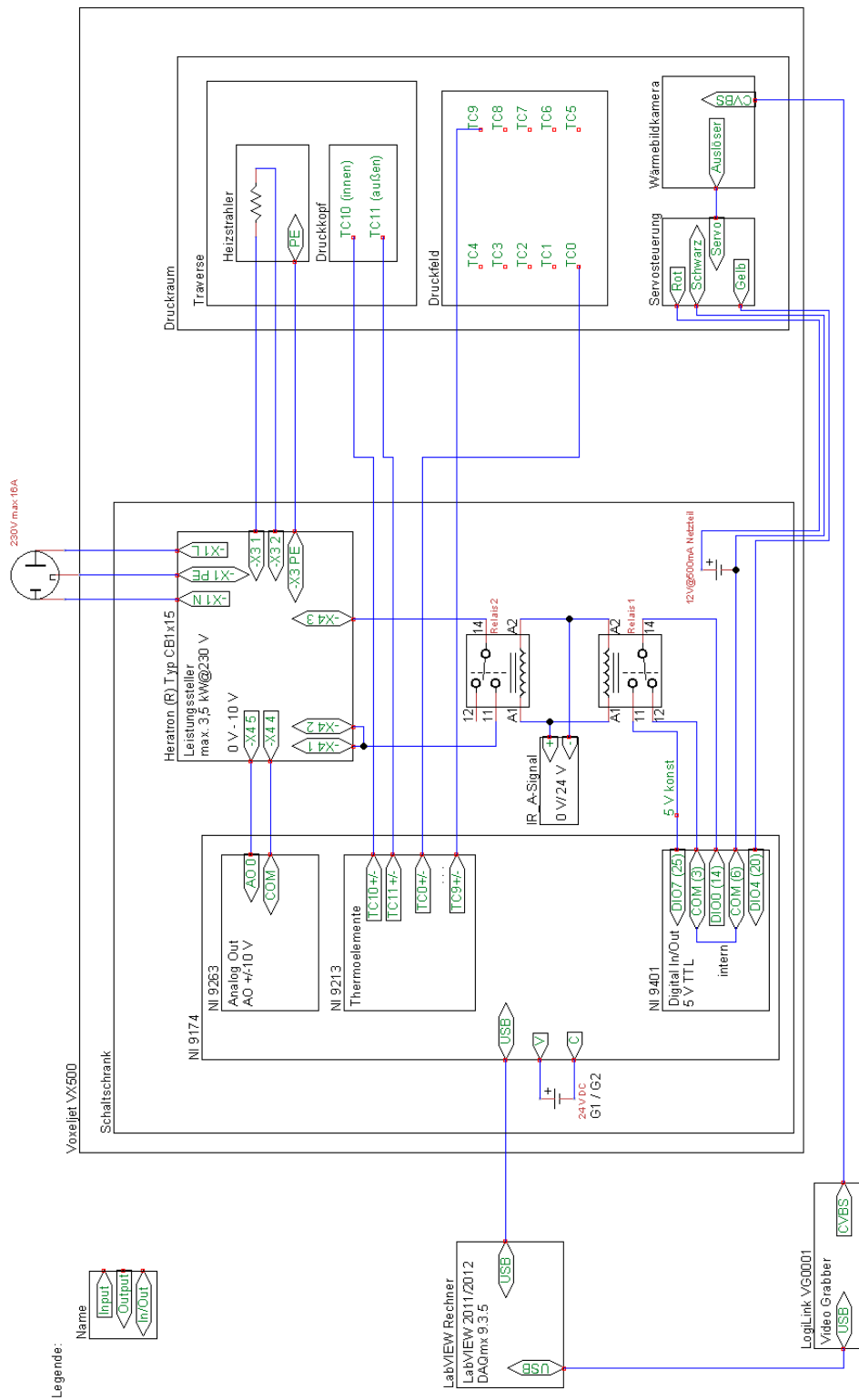


Abbildung 1: Schaltplan NI-Steuerung

Umrechnungstabelle Gasdurchlässigkeitsprüfgerät

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	1444	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 2: Umrechnungstabelle Gasdurchlässigkeitsprüfgerät

EDX Analysen

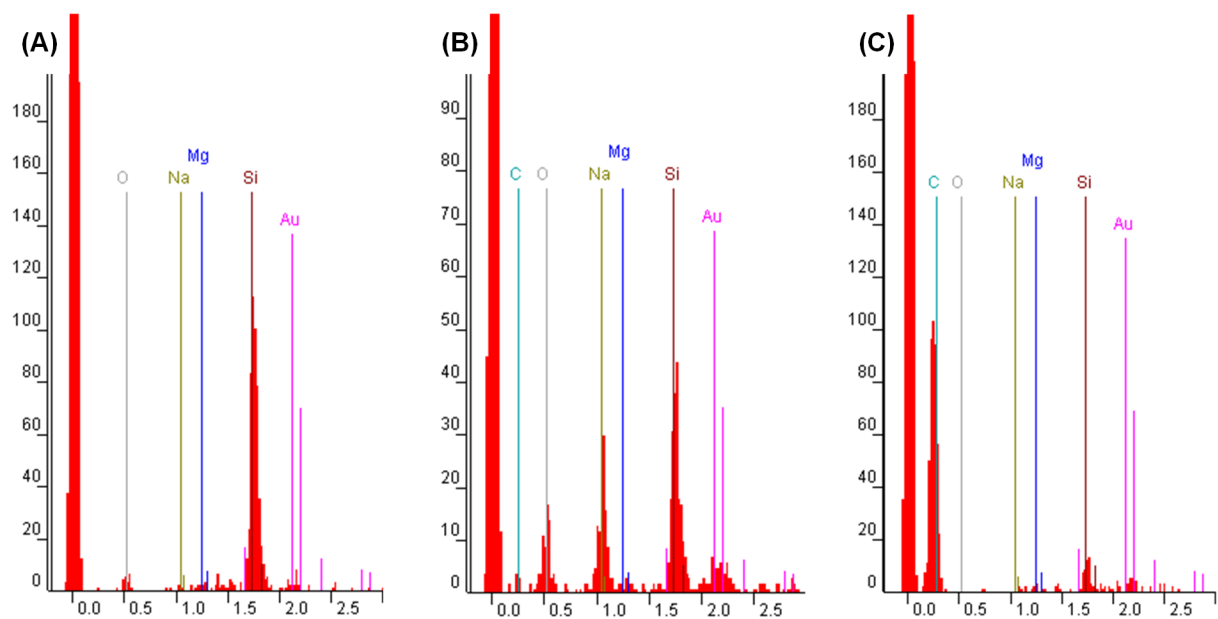


Abbildung 3: EDX Analysen der Proben, die zwischen Druckprozessende und Trocknung 24 h gelagert wurden (vgl. Abbildung 5.23). Markierung der Elemente nach JOEL (2015)

Signifikanzberechnungen

		AUSGANGSGRÖßEN									
		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	
EINGANGSGRÖßEN	X1	n(ges)	255	255	255	255	17	255	17	255	254
		n(max)	30	30	105	45	7	30	2	105	30
		F	0,735	20,327	4,749	1,687	4,531	0,656	0,118	6,306	0,381
		f(krit)	1,67	1,67	1,32	1,51	3,48	1,67	246,45	1,32	1,67
	X2	n(ges)	225	238	239	239	16	225	16	237	239
		n(max)	45	43	44	45	3	45	3	15	45
		F	0,566	24,388	7,212	19,006	1,225	0,499	0	8,739	1,513
		f(krit)	1,52	1,53	1,52	1,51	19,43	1,52	19,43	2,15	1,51
	X3	n(ges)	225	221	224	224	15	225	15	208	207
		n(max)	45	15	44	45	7	45	3	105	29
		F	45,778	2,447	0,919	3,644	0,635	33,241	146,609	5,069	0,209
		f(krit)	1,52	2,16	1,52	1,52	3,96	1,52	19,42	1,33	1,69
X4	n(ges)	120	120	120	120	8	120	8	120	119	
	n(max)	105	105	105	105	7	105	7	105	15	
	F	8,204	1,690	1,010	0,978	0,881	8,299	0,000	1,041	0,701	
	f(krit)	1,37	1,37	1,37	1,37	4,21	1,37	4,21	1,37	2,18	
X5	n(ges)		150	150	150	10			150	149	
	n(max)		45	45	45	7			45	45	
	F		0,483	1,298	2,179	2,167			0,653	0,575	
	f(krit)		1,53	1,53	1,53	4,1			1,53	1,53	
X6	n(ges)		195	195	195	14			195	194	
	n(max)		45	45	45	4			45	45	
	F		0,741	0,769	0,417	9,054			0,689	0,325	
	f(krit)		1,52	1,52	1,52	8,73			1,52	1,52	
X7	n(ges)		195	195	195	13			195	194	
	n(max)		45	45	45	3			45	45	
	F		1,004	0,693	3,792	21,928			0,727	0,725	
	f(krit)		1,52	1,52	1,52	19,41			1,52	1,52	
X8	n(ges)		150	150	150	10			150	149	
	n(max)		45	105	105	7			105	45	
	F		0,879	0,928	0,966	18,572			1,020	1,196	
	f(krit)		1,53	1,35	1,35	4,1			1,35	1,53	

X1	Binderkonzentration
X2	Fluideintrag
X2	Energieeintrag
X4	Zykluszeit
X5	Zeitspanne vor Trocknung
X6	Trocknungsdauer
X7	Zeitspanne nach Trocknung
X8	Trocknungstemperatur

Y1	Prozesstemperatur Scheibenpr.
Y2	Dichte
Y2	Permeabilität
Y4	Festigkeit
Y5	Feuchtegehalt
Y6	Prozesstemperatur Ringpr.
Y7	Curlneigung
Y8	Fluidmigration
Y9	Abrieb

Signifikant
Nicht Signifikant
Nicht Relevant

Abbildung 4: Signifikanzberechnungen

Studentische Arbeiten

Name	Typ der Arbeit	Titel (Jahr)
Angerpointner, S.	Semesterarbeit	3D-Drucken mit anorganischen Sand-Binder-Systemen: Charakterisierung von Festigkeit, Feuchtigkeitsgehalt und Gasdurchlässigkeit (2013)
Eibl, S.	Semesterarbeit	3-D-Drucken mit einem anorganischen Sand-Binder-System: Untersuchung der (äquibiaxialen) Biegefestigkeit, Gasdurchlässigkeit und Fluidmigration unter Berücksichtigung des Energieeintrags (2014)
Heilmeier, F.	Semesterarbeit	3D-Drucken mit anorganischen Sand-Binder-Systemen: Charakterisierung von Migration, Abriebfestigkeit und Oberflächenbeschaffenheit (2013)
Kopf, J.	Semesterarbeit	3-D-Drucken mit einem anorganischen Sand-Binder- System: Untersuchung der Festigkeit, Gasdurchlässigkeit und Fluid- Migration unter Berücksichtigung der Zykluszeit (2014)
Kümmel, D.	Semesterarbeit	3-D-Drucken mit einem anorganischen Sand-Binder- System: Untersuchung von Postprocessing und Lagerung (2015)
Landesberger, M.	Semesterarbeit	3D-Drucken mit anorganischen Formstoffsyste- men: Prozessentwicklung und Untersuchung der Fluidmigration (2014)
Schmidt, M.	Semesterarbeit	3D-Drucken mit einem anorganischen Sand-Binder-System: Untersuchung der äquiaxialen Biegefestigkeit, Gasdurchlässigkeit und Fluid- migration unter Berücksichtigung des Fluidein- trags (2014)
Schreiber, M.	Semesterarbeit	3D-Drucken mit einem anorganischen Sand-Binder System: Untersuchung der Druckfestig- keit, Gasdurchlässigkeit und Dichte (2014)

Abbildungsverzeichnis

2.1	Übersicht der Bindersysteme zur Form- und Kernherstellung	4
2.2	Wassermantelkern eines 6-Zylinder-Kurbelgehäuses	6
2.3	Herstellung von einem Natriumsilikatbinder	8
2.4	Aushärtung eines Natriumsilikatbinders	8
2.5	Anlagenschema des Stereolithographieprozesses und Prinzip der generativen Fertigung	11
2.6	Verfahrensschritte bei der Herstellung einer Sandgussform mittels 3-D-Drucken .	12
2.7	Phasen der intermittierenden Tropfengenerierung	13
2.8	Innenansicht eines voxeljet VX4000 3-D-Druckers	14
2.9	Kontinuierlich arbeitender 3-D-Drucker	15
2.10	Gedrucktes Kernpaket eines Kurbelgehäuses und damit hergestelltes Gussteil .	16
2.11	Spannungsverteilung beim 4-Kugelversuch	19
2.12	Bindung von Flüssigkeit im Hohlraum zwischen Feststoffpartikeln	21
4.1	Systembeschreibung	24
4.2	REM-Aufnahme HSQ 85	25
4.3	REM-Aufnahme des Binders	26
4.4	VX500 3-D-Druck-System	27
4.5	VX500 3-D-Druck-System am Lehrstuhl utg	28
4.6	Druckkopf	29
4.7	Spectra SL-128 AA	30
4.8	LabVIEW Programm IR-Strahler.exe	35
4.9	Testmuster	38
4.10	CAD Standardjob	39
4.11	In-Prozess-Ablauf (real)	41
4.12	In-Prozess-Ablauf (schematisch)	41
4.13	Messverfahren Wärmebildkamera	43
4.14	Abfolge der Post-Prozess Arbeitsschritte	45
4.15	Finishingvorgang Scheibenprüfkörper	46
4.16	Permeabilitätsbestimmung	47
4.17	Permeabilität K über Druckdifferenz $\Delta p_{1,2}$	48
4.18	Universalprüfmaschine Z020 mit eingebauter Scheibentest-Aufnahme	49
4.19	Bruchbild eines Scheibenprüfkörpers	50
4.20	Ausprägungen von Curl	51
4.21	Ringprüfkörper vor und nach dem Finishing mit Druckluft	51
4.22	Abriebprüfgerät	52
4.23	Einteilung der Eingangsgrößen	55
4.24	Untersuchung der Anisotropie in z-Richtung	57
4.25	Größe und Orientierung der eingebraten Ungängen	58
4.26	CAD Modell des 3-Zylinder-Zylinderkopf Wassermantelkerns	59
5.1	Verlauf der Oberflächentemperaturen ohne Leistungssteuerung	60
5.2	Verlauf der Oberflächentemperaturen mit Leistungssteuerung	61
5.3	Mittlere Erwärmung der Prüfkörper während der Druckphase	61

5.4	Festigkeitsverteilung eines nicht temperaturkompensierten und eines temperaturkompensierten Jobs	62
5.5	Festigkeitsverteilung von einem Job mit einem instabil und einem stabil arbeitenden Druckkopf	63
5.6	In-Prozess-Schuttdichte	64
5.7	Hauptergebnisse der Scheibenprüfkörper für sieben Referenzjobs	65
5.8	Hauptergebnisse der Ringprüfkörper für sieben Referenzjobs	66
5.9	REM Aufnahmen Referenzprüfkörper	67
5.10	Darstellung der Hauptergebnisse der Scheibenprüfkörper in Abhängigkeit der Binderkonzentration	68
5.11	Darstellung der Hauptergebnisse der Ringprüfkörper in Abhängigkeit der Binderkonzentration	69
5.12	REM Aufnahmen Scheibenprüfkörper mit 5% und 15% Binderkonzentration . . .	70
5.13	EDX Analyse an Bruchfläche	71
5.14	Hauptergebnisse der Scheibenprüfkörper in Abhängigkeit des Fluideintrags . . .	72
5.15	Hauptergebnisse der Ringprüfkörper in Abhängigkeit des Fluideintrags	73
5.16	REM Aufnahmen Scheibenprüfkörper mit 5% und 15% Fluideintrag	74
5.17	Hauptergebnisse des Scheibenprüfkörpers in Abhängigkeit des Energieeintrags . . .	75
5.18	Hauptergebnisses des Ringprüfkörpers in Abhängigkeit des Energieeintrags . . .	76
5.19	REM Aufnahmen Scheibenprüfkörper mit 0 J und 11,205 kJ Energieeintrag . . .	77
5.20	Hauptergebnisse des Scheibenprüfkörpers in Abhängigkeit der Zykluszeit	78
5.21	Hauptergebnisse des Ringprüfkörpers in Abhängigkeit der Zykluszeit	79
5.22	Hauptergebnisse in Abhängigkeit der Zeitspanne vor der Trocknung	80
5.23	REM Aufnahmen Scheibenprüfkörper ohne und mit 24 h Zeitspanne vor Trocknung	81
5.24	Hauptergebnisse in Abhängigkeit der Trocknungsdauer	82
5.25	Hauptergebnisse in Abhängigkeit der Zeitspanne nach der Trocknung	83
5.26	Hauptergebnisse in Abhängigkeit der Trocknungstemperatur	84
5.27	Einfluss der y-Druckrichtung	85
5.28	Untersuchung der Anisotropie in z-Richtung	86
5.29	Untersuchung der Anisotropie in z-Richtung	87
5.30	Detektion von prozessbedingten Schwachstellen (Breite und Abstand)	88
5.31	Detektion von prozessbedingten Schwachstellen (Orientierung und Länge) . . .	89
5.32	Fotographische Aufnahmen des gedruckten 3-Zylinder-Zylinderkopf Wassermantelkerns	90
6.1	Verteilung und Abhängigkeit der Feuchtegehalte des SBS	93
6.2	In-Prozess-Klima bei Referenzeinstellungen	97
6.3	In-Prozess-Klima während Lagerzeit im Sandlabor	98
6.4	Regressionsanalyse für ΔT^{S*}	103
6.5	Regressionsanalyse für ρ^{S*}	105
6.6	Abhängigkeiten der normierten Permeabilität K^{S*}	107
6.7	Auftragung der normierten Permeabilität K^{S*} über der normierten Dichte ρ^{S*} . .	108
6.8	Auftragung der normierten Permeabilität K^{S*} und der normierten, berechneten Permeabilität $K_{ber.}^{S*}$	108

6.9	Regressionsanalyse für die Abhängigkeit der normierten Festigkeit σ_B^{S*}	110
6.10	Regressionsanalyse für die Abhängigkeiten des normierten Feuchtegehalts ϕ^{S*} .	113
6.11	Regressionsanalyse für die Abhängigkeit der normierten Prozesstemperatur der Ringprüfkörper ΔT^{R*}	115
6.12	Quadratisches Polynom für Abhängigkeit der normierten Curlneigung C^{R*}	115
6.13	Regressionsanalyse für die Abhängigkeit der normierten Fluidmigration Δm_F^{R*} .	116
6.14	Regressionsanalyse für die Abhängigkeit des normierten Abriebs Δm_A^{R*}	118
1	Schaltplan NI-Steuerung	126
2	Umrechnungstabelle Gasdurchlässigkeitsprüfgerät	127
3	EDX Analysen der 24 h gelagerten Proben	128
4	Signifikanzberechnungen	129

Tabellenverzeichnis

2.1	Kommerziell etablierte additive Fertigungsverfahren	10
4.1	Spezifikationen Spezielsand HSQ 85	25
4.2	Spezifikationen Spectra SL-128 AA	30
4.3	Spezifikationen Beschichter	32
4.4	Spezifikationen IR-Strahler	33
4.5	Parameter Heizungssystem	34
4.6	NI-Hardware	34
4.7	Faktoreinstellungen des Referenzjobs	54
4.8	Faktoren und Stufen des Versuchsplans	56
6.1	Systematische Fehler	92
6.2	Zufällige Fehler im Pre-Prozess	95
6.3	Zufällige Fehler im In-Prozess	98
6.4	Zufällige Fehler im Post-Prozess	99
6.5	Zufällige Fehler bei der Quantifizierung der Qualitätsmerkmale	101

Literaturverzeichnis

- Adunka, F. (2007). *Messunsicherheiten: Theorie und Praxis*. 3. Aufl. Essen: Vulkan-Verl.
- American Foundrymen's Society, Hrsg. (1952). *Foundry Sand Handbook*. 6th Edition. Chicago, Illinois: American Foundrymen's Society Incorporated.
- Andreß, H. J. (2010). *F-Verteilung*. URL: <http://eswf.uni-koeln.de/glossar/surfstat/fvert.htm> (besucht am 21.07.2015).
- ASTM (2013). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*.
- Baehr, H. D. und K. Stephan (2010). *Wärme- und Stoffübertragung: Mit zahlreichen Tabellen sowie 62 Beispielen und 94 Aufgaben*. 7., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Baier, J. et al. (2010). *Handbuch der Gußfehler: Formsandbeeinflussbare Fehler und deren Vermeidung*. 4. Aufl. Marl: S&B Industrial Minerals GmbH.
- Bartholomé, E. (1980). *Analysen- und messverfahren*. 4., neubearb. u. erw. Aufl. Bd. 5. Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie. Weinheim und New York: Verlag Chemie.
- Becker, H. H. et al. (2014). „Vollständig verkettete anorganische Kernfertigung in der Zylinderkopffertigung bei Volkswagen“. In: *GIESSEREI* 101.07, S. 30–36.
- Beitz, W. und K. H. Küttner (1995). *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Achtzehnte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Berger, U., A. Hartmann und D. Schmid (2013). *Additive Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*. 1. Aufl. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel.
- Boerger, A. (2002). „The ball on three balls test for strength testing of brittle discs: stress distribution in the disc“. In: *Journal of the European Ceramic Society* 22, S. 1425–1436.
- Brintzinger, H. und W. Bubam (1933). „Zementchemische Untersuchungen“. In: *Kolloid-Zeitschrift* 1, S. 87–93.
- Brunhuber, E. (1970). *Giessereilexikon*. Berlin: Schiele & Schön.
- Bühning-Polaczek, A., W. Michaeli und G. Spur (2014). *Handbuch Urformen*. [vollst. überarb. Neuaufl.] Ed. Handbuch Fertigungstechnik. München: Hanser.
- Chhabra, M. und R. Singh (2011). „Rapid casting solutions: a review“. In: *Rapid Prototyping Journal* 17.5, S. 328–350.
- Cibis, D. und K. Krüger (2008). „Influencing Parameters in Droplet Formation for DoD Printing of Conductive Inks“. In: *Ceramic Interconnect (CICMT)*, S. 417–423.
- Clements, A. (2006). *Principles of computer hardware*. 4. rev. ed. Oxford: Oxford Univ. Press.
- Conner, B. P. et al. (2014). „Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services“. In: *Additive Manufacturing* 1–4, S. 64–76.
- Danzer, R., W. Harrer et al. (2006). „The ball on three balls test - Strength and failure analysis of different materials“. In: *Journal of the European Ceramic Society* 27, S. 1481–1485.

- Danzer, R., T. Lube et al. (2002). „Verfahren und Einrichtung zur Bestimmung der Bruchfestigkeit von spröden Werkstoffen“. AT 411 714 B.
- Danzer, R., P. Supancic und W. Harrer (2006). „Biaxial Tensile Strength Test for Brittle Rectangular Plates“. In: *Journal of the Ceramic Society of Japan* 114, S. 1054–1060.
- Danzer, R., P. Supancic und W. Harrer (2009). „Der 4-Kugerversuch zur Ermittlung der biaxialen Biegefestigkeit spröder Werkstoffe“. In: *Technische Keramische Werkstoffe*. Hrsg. von Kriegesmann. Bd. 113.
- Derby, B. und N. Reis (2003). „Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions“. In: *MRS Bulletin* 28.11, S. 815–818.
- Dimitrov, D. und K. Schreve (2006). „Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives“. In: *Rapid Prototyping Journal* 12.3, S. 136–147.
- DIN (1995). *DIN 1319-1 - Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Berlin.
- DIN (1996). *DIN 1319-3 - Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*. Berlin.
- DIN (1999). *DIN 1319-4 - Grundlagen der Meßtechnik - Teil 4: Auswertung von Messungen Meßunsicherheit*. Berlin.
- DIN (2003). *DIN 8580 - Fertigungsverfahren*. Berlin.
- DIN (2011). *DIN EN ISO 139 - Textilien - Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung*. Berlin.
- Drossel, G. (1999). *Aluminium-Taschenbuch: Umformen von Aluminium-Werkstoffen, Gießen von Aluminium-Teilen, Oberflächenbehandlung von Aluminium, Recycling und Ökologie*. 15. Aufl., 1. überarb. Ausg. Bd. Hrsg.: Aluminium-Zentrale Düsseldorf ; Bd. 2. Aluminium-Taschenbuch. Düsseldorf: Aluminium-Verl.
- Drummer, D., M. Drexler und K. Wudy (2015). „Density of Laser Molten Polymer Parts as Function of Powder Coating Process during Additive Manufacturing“. In: *Procedia Engineering* 102, S. 1908–1917.
- ebs Automatisierte Thermographie und Systemtechnik GmbH (2015). *Spezifikation Avio (NEC) Thermo GEAR G100EX*.
- Ederer, I. (2004). „Werkzeuglose Formherstellung mittels 3D-Drucktechnologie“. In: *GIESSE-REI - PRAXIS* 11/2004, S. 407–410.
- Engelhardt, W. und H. Pitter (1951). „Über die Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität und Korngröße bei Sanden und Sandsteinen“. In: *Heidelberger Beiträge zur Mineralogie und Petrographie* 2.6, S. 477–491.
- Feßmann, J. und H. Orth (2002). *Angewandte Chemie und Umwelttechnik für Ingenieure: Handbuch für Studium und betriebliche Praxis*. 2. Aufl. Landsberg/Lech: ecomed Sicherheit.

- FINDER S.p.A. (2014). *Spezifikation Serie 38 - Koppelrelais*. URL: <http://gfinder.findernet.com/assets/Series/369/S38DE.pdf> (besucht am 27.01.2015).
- Fischer, G. (1990). *Kerntrieb-Prüfaparat Typ PAZ*. Schaffhausen.
- Flemming, E. und W. Tilch (1993). *Formstoffe und Formverfahren: Mit 118 Tabellen*. 1. Aufl. Leipzig und Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.
- Fouad, N. A. und T. Richter (2008). *Leitfaden Thermografie im Bauwesen: Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung*. 3., unveränd. Aufl. Stuttgart: IRB Verlag.
- FUJIFILM Dimatix, Inc. (2010). *Spezifikation Spectra SL-128 AA*. URL: <http://www.fujifilmusa.com/shared/bin/PDS00008.pdf> (besucht am 27.01.2015).
- Gandert, J. (2014). „Innovative Fertigung: Mythos 3D-Druck- Was ist dran?“ In: *GIESSEREI - PRAXIS* 04, S. 180–181.
- Gartner, J. (2011). *3D-Druck von Sandformen verschafft Gießereien einen Vorsprung*. Hrsg. von 3Druck.com. URL: <http://3druck.com/hersteller/3d-druck-von-sandformen-verschafft-giessereien-einen-vorsprung-021576/> (besucht am 30.07.2015).
- Gebhardt, A. (2013). *Generative Fertigungsverfahren: Additive manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 4., neu bearb. und erw. Aufl. München: Hanser.
- Gebhardt, A. (2014). *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*. München: Hanser.
- Gercek, H. (2007). „Poisson's ratio values for rocks“. In: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44, S. 1–13.
- Gibson, I., D. Rosen und B. Stucker (2015). *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing*. 2. ed. New York, NY: Springer.
- Gobrecht, J. (2009). *Werkstofftechnik - Metalle*. 3., überarb. Aufl. Oldenbourg-Lehrbücher für Ingenieure. München: Oldenbourg.
- Görke, H. M., U. Zilles und M. Demary (2014). „Optimierung der Sieblinie durch Konfektionierung“. In: *GIESSEREI - PRAXIS* 65.5, S. 217–219.
- Grefhorst, C. (2011). „Herausforderungen bei der Umstellung auf eine anorganische Form- und Kernherstellung“. In: *GIESSEREI* 98.12, S. 74–79.
- Günther, D. et al. (2014). „Continuous 3D-printing for additive manufacturing“. In: *Rapid Prototyping Journal* 20.4, S. 320–327.
- Hasse, S. (2003). *Guß- und Gefügefehler: Erkennung, Deutung und Vermeidung von Guß- und Gefügefehlern bei der Erzeugung von gegossenen Komponenten*. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin: Schiele & Schön.
- Hasse, S. (2008). *Giesserei Lexikon*. Berlin: Schiele & Schön.
- Heraeus Noblelight GmbH (2015). *Spezifikation IR-Strahler: Infrarot-Strahler für industrielle Prozesse*. URL: http://www.heraeus-noblelight.com/media/webmedia_local/

- media/pdf/ip/products_6/irfrindustrie/irstrahlerfrdieindustrie.pdf (besucht am 02.02.2015).
- Heraeus Noblelight GmbH (2010). *Spezifikation HERATRON CB 1x15: Leistungssteller für Infrarot-Systeme*.
- Höchsmann, R. (2013). „Wie das 3-D-Druckverfahren Gießereiprozesse revolutioniert“. In: *GIESSEREI* 100.11, S. 66–68.
- Höchsmann, R. (2014). „Perspektiven 3D-Druck: Auf dem Sprung in die Serienfertigung“. In: *GIESSEREI* 101.03, S. 26.
- Hölting, B. und W. G. Coldewey (2013). *Hydrogeologie: Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie*. 8. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Honeywell International Inc. (2007). *Spezifikation HIH-4010/4020/4021 Series: Humidity Sensors*. URL: <http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-hih4010-4020-4021%20series-product-sheets-009020-1-en.pdf?name=HIH-4021-002> (besucht am 02.02.2015).
- Hull, C. W. (1986). „Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography“. US Patent 4,575,330.
- Hüttenes-Albertus (2012a). *Produktinformation HA-Spezialsand HSQ 85*.
- Hüttenes-Albertus (2012b). *Sicherheitsdatenblatt ANORGIT 8886*.
- Iden, F. et al. (2011). „Strukturen von Cold-Box-Bindersystemen und die Möglichkeit ihrer Veränderung“. In: *GIESSEREI - Rundschau* 58.1, S. 3–8.
- Iler, R. K. (1979). *The chemistry of silica: Solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry*. A Wiley-Interscience publication. New York: Wiley.
- Jelinek, P. und H. Polzin (2003). „Strukturuntersuchungen und Festigkeitseigenschaften von Natrium-Silikat-Bindern“. In: *GIESSEREI - PRAXIS* 2, S. 51–60.
- JOEL (2015). *Energy table for EDS analysis*. URL: <https://www.unamur.be/services/microscopie/sme-documents/Energy-20table-20for-20EDS-20analysis-1.pdf> (besucht am 28.04.2015).
- Karunakaran, K. P. et al. (2012). „Rapid manufacturing of metallic objects“. In: *Rapid Prototyping Journal* 18.4, S. 264–280.
- Königsreuther, P. (2014). *Alternativer Harzbinder erhöht die 3D-Druckqualität*. Hrsg. von MM MaschinenMarkt online. URL: http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/additive_fertigung/articles/468348/ (besucht am 30.07.2015).
- Kramer, C. (2002). *Praxishandbuch Thermoprozess-Technik: Grundlagen, Verfahren*. Bd. 1. Essen: Vulkan-Verl.
- Lange, E. (2014). „Innovativer 3-D-Druck in Gießereien“. In: *GIESSEREI* 101, S. 75–79.

- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3., korrigierte Aufl. VDI-Buch. Berlin und Heidelberg: Springer.
- Löchte, K. und R. Boehm (2005). „CORDIS - Das Anorganische Bindersystem - Eigenschaften und Erfahrungen“. In: *GIESSEREI - Rundschau* 52, S. 68–70.
- Maxim Integrated Products, Inc. (2008). *Spezifikation DS18B20: Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. URL: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (besucht am 02.02.2015).
- Müller, J. (2007). „Serieneinsatz des anorganischen Bindemittelsystems INOTEC im Leichtmetallguss“. In: *GIESSEREI - PRAXIS* 5, S. 192–194.
- National Instruments Corp. (2009a). *Spezifikation NI 9213: 16-Channel Thermocouple Input Module*. URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374916a.pdf> (besucht am 11.02.2015).
- National Instruments Corp. (2009b). *Spezifikation NI 9263: 4-Channel, +/-10 V, 16-Bit Analog Voltage Output Module*. URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/373781e.pdf> (besucht am 11.02.2015).
- National Instruments Corp. (2011). *Spezifikation NI cDAQ 9174: USB Chassis*. URL: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-178> (besucht am 11.02.2015).
- National Instruments Corp. (2012). *Spezifikation NI 9401: 8-Channel, TTL Digital Input/Output Module*. URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374068f.pdf> (besucht am 11.02.2015).
- Pabel, T. (2009). „Vorteile nicht nur für die Umwelt: Verbesserte Eigenschaften von Al-Gussteilen durch Einsatz von Inotec-Kernen“. In: *GIESSEREI - Erfahrungsaustausch* 53.7/8, S. 37–44.
- Polzin, H. (2007). „Übersicht chemisch härtende Formstoffe“. In: *GIESSEREI - PRAXIS* 9, S. 334–357.
- Polzin, H. (2012). *Anorganische Binder zur Form- und Kernherstellung in der Gießerei*. 1. Aufl. Berlin: Schiele & Schön.
- Psimenos, A. C. und G. Eder (2011). „Die neue CLP-Verordnung der EU und ihre Auswirkungen auf die Giessereiindustrie“. In: *GIESSEREI - Rundschau* 58.1/2, S. 10–13.
- Quitter, D. (2011). *Anorganisches Bindersystem für den 3D-Druck präsentiert*. Hrsg. von konstruktionspraxis.de. URL: <http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/werkstoffe/rapidtechnologien/articles/325040/> (besucht am 30.07.2015).
- Ramakrishnan, R. et al. (2014). „3D Printing of Inorganic Sand Moulds for Casting Applications“. In: *Advanced Materials Research* 1018, S. 441–449.
- Reus, M. und L. Ratke (2009). „On the fraction of sand grains bounded in molding materials - a new measurement technique“. Köln.
- Riker, S. (2015). „Leistungsfähig gießen mit 3-D-Druck und simulationsgetriebenem Design“. In: *GIESSEREI* 102.6, S. 126–129.

- Roller, R. (2009). *Fachkunde für gießereitechnische Berufe: Technologie des Formens und Gießens*. 6., überarb. und erw. Aufl. Europa Lehrmittel. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik*. 3., überarb. Aufl. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe.
- Sachs, E. et al. (1990). „Dreidimensionale Drucktechniken“. EP0431924B1.
- Sachs, L. (1972). *Statistische Auswertungsmethoden*. Dritte, neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schrödter, H. (1985). *Verdunstung: Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schulze, D. (2014). *Pulver und Schüttgüter: Fließeigenschaften und Handhabung*. 3., erg. Aufl. 2014. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg.
- Schürmann, H. (2013). „Der 3D-Druck wird erwachsen“. In: *VDI Nachrichten* 21.06.2013.
- Ségaud, J. M. (2014). „Vision 2025 - 3D - Drucken von Kernen“. In: *GIESSEREI* 101.03, S. 24–25.
- Snelling, D. A. (2015). „A Process for Manufacturing Metal-Ceramic Cellular Materials with Designed Mesostructure“. Dissertation. Blacksburg, Virginia: State University. (Besucht am 04.08.2015).
- Spath, S. und H. Seitz (2014). „Influence of grain size and grain-size distribution on workability of granules with 3D printing“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70.1-4, S. 135–144.
- Squires, G. L. (2001). *Practical physics*. Fourth edition. Cambridge [etc.]: Cambridge University Press.
- Squires, G. L. und H. W. Sighting (1971). *Meßergebnisse und ihre Auswertung: Eine Anleitung zum praktischen naturwissenschaftlichen Arbeiten ; mit zahlreichen Formeln und Tabellen*. De Gruyter Lehrbuch. Berlin: de Gruyter.
- Stachowicz, M. et al. (2010). „Effect of hardening methods of moulding sands with water glass on structure of bonding bridges“. In: *Archives of Foundry Engineering* 3, S. 123–128.
- Stankiewicz, M. et al. (2010). „The scope of application of incremental rapid prototyping methods in foundry engineering“. In: *Archives of Foundry Engineering* 10, S. 405–410.
- Stieß, M. (2009). *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. 3., vollst. neu bearb. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tropea, C., J. F. Foss und A. L. Yarin, Hrsg. (2007). *Springer Handbook of Experimental fluid mechanics*. Berlin: Springer Science+Business Media.
- Utela, B. et al. (2008). „A review of process development steps for new material systems in thress dimensional printing (3DP)“. In: *Journal of Manufacturing Processes* 10, S. 96–104.

- VDG (1996). *P41 - Prüfung von tongebundenen Formstoffen - Bestimmung der Gasdurchlässigkeit*. Düsseldorf.
- VDG (1997). *P38 - Prüfung von tongebundenen Formstoffen - Bestimmung der Festigkeit*. Düsseldorf.
- VDG (1999). *P71 - Bindemittelprüfung - Biegefestigkeit von warmhärtenden, kunstharzgebundenen feuchten Formstoffen: Biegefestigkeit von warmhärtenden, kunstharzgebundenen feuchten Formstoffen*. Düsseldorf.
- VDG (2013). *VDG-Merkblätter Verzeichnis*. Hrsg. von BDGuss. URL: http://www.vdg.de/fileadmin/content/03_documents/VDG_Merkblaetter_Verzeichnis.pdf (besucht am 03.08.2015).
- VDI (2013). *3405-1 - Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen Güteüberwachung*. Berlin.
- VDI (2014). *3405 - Additive Fertigung - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Berlin.
- VDI (2015). *3405-3 - Additive Fertigungsverfahren - Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen*. Berlin.
- voxeljet AG (2009a). *Benutzerhandbuch RAPIX 3D*.
- voxeljet AG (2009b). *Betriebsanleitung VX500: Maschinen Nr.: VX500 - 0005*.
- voxeljet AG (2013). *Spezifikation VX500*. URL: http://www.voxeljet.de/fileadmin/Voxeljet/Systems/VX_500/voxeljet_3D-Drucker_VX500.pdf (besucht am 27.01.2015).
- voxeljet AG (2015). *VX4000 - Das großformatige 3D-Drucksystem*. URL: <http://www.voxeljet.de/systems/vx4000/> (besucht am 29.07.2015).
- Wagner, W. (1998). *Wärmeübertragung: Grundlagen*. 5., überarb. Aufl. Vogel-Fachbuch. Würzburg: Vogel.
- Wallenhorst, C. (2010). „Grundlagen zum Verständnis der anorganischen Kernfertigung“. In: *GIESSEREI - PRAXIS* 6, S. 181–184.
- Wallenhorst, C., M. Koerschgen und A. Kasperowski (2010). „Steuerung der Prozessstabilität bei der anorganischen Kernfertigung“. In: *GIESSEREI* 97.12.
- Wegner, A. (2013). „Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen“. In: *RTejournal* 10. URL: www.rtejournal.de/ausgabe10/3818 (besucht am 22.07.2015).
- Weissenbek, E. et al. (2011). *Zylinderkopffertigung der Zukunft Ökologie, Ökonomie und Werkstoffoptimierung im Einklang*. Hrsg. von MTZ.
- Wohlers, T. und T. Caffrey (2015). *Wohlers report 2015: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates.

Wolff, H. (2009). „Form- und Kernherstellung mit chemisch gebundenen Formstoffen“. In: *GIES-SEREI* 96.5, S. 54–63.

Woods, K. und S. Ravi (2015). „Design Considerations for 3-D-Printed Cores and Molds“. In: *Modern Casting*, S. 24–29.