

ABSCHLUSSBERICHT

„Anorganisches Kernpaketverfahren mit dünnwandigen Strukturen zur Energieeinsparung“

DBU-Projekt 35497

Antragsteller: Peak Deutschland GmbH
Dresdner Straße 58
01683 Nossen

Partner: IGCV
Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
Verarbeitungstechnik
Lichtenbergstraße 15
85748 Garching

Pinter Guss GmbH
Brunnwiesenstraße 2
94469 Deggendorf

Projektgesamtkosten: 561.717,00 €

Fördermittelanteil: 276.771,00 €

Laufzeit: 01.11.2020 bis 31.10.2023

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung des Gesamtvorhabens.....	1
2	Angaben zum Antragsteller und der Kooperationspartnern	2
2.1	Antragsteller:.....	2
2.2	Kooperationspartner 1:.....	3
2.3	Kooperationspartner 2:.....	4
3	Umweltrelevanz.....	5
4	Zielsetzung des Vorhabens	6
5	Stand der Technik	7
6	Innovativer Charakter des Projektes.....	10
7	Energieeinsparung	11
8	Versuchsdurchführung IGCV.....	12
8.1	Herstellung von Sandkernen für den Metallguss	12
8.2	Zielsetzung	13
9	Hauptteil.....	15
9.1	Arbeitspaket: Hohlkernerzeugung durch einen Folienkern	15
9.2	Arbeitspaket: Hohlkernzeugung durch einen Eiskern	17
9.2.1	Verwendete Materialien.....	18
9.2.2	Herstellung von Hohlkernen mittels verlorener Eiskerne	19
9.2.3	3-Punkt-Biegeprüfung	21
9.2.4	Überprüfung von Anhaftungen	22
9.2.5	Messung des Entkernverhaltens	22
9.2.6	Herstellung eines Doppelrohrkerns als Anwendungsdemonstrator.....	23
9.2.7	Ergebnisse	24
9.2.8	Diskussion.....	27
9.2.9	Schlussfolgerungen zur Hohlkerntechnologie mittels Eiskern.....	32
10	Literaturverzeichnis IGVC	34
11	Veröffentlichungen.....	35

12	Versuchsdurchführung PEAK	36
12.1	Kernschießmaschine und Werkzeug	36
12.2	Parameter	37
12.3	Versuchsdurchführung	38
12.3.1	Variante 1 Vollkern als Referenz	38
12.3.2	Variante 2 Folienkern	39
12.3.3	Variante 3 Schrumpfschlauchkern	40
12.3.4	Ergebnisauswertung	42
12.4	Alternative Werkstoffe für Werkzeuge	48
13	Literaturverzeichnis PEAK	53
14	Versuchsdurchführung Pinter Guss Gefrierversuche mit Trockeneis und Herstellung additiv gefertigter Hohlformern	54
14.1	Kurzbeschreibung	54
15	Herstellung von Eiskernen unter der Verwendung von Trockeneis	55
15.1	Versuchsaufbau zur Messung des Abkühlverhaltens	55
15.1.1	Kerngeometrie	55
15.1.2	Vorbereitung der Mischungen	56
15.1.3	Versuchsdurchführung	58
15.1.4	Entformen	59
15.1.5	Datenauswertung	60
15.1.6	Entformungsverhalten	63
15.1.7	Bewertung	64
15.2	Vorversuche eines Eiskerns für eine Realgeometrie	65
15.2.1	Vorbereitung	65
15.2.2	Durchführung	67
15.2.3	Datenauswertung	71
15.2.4	Auftauen	78
15.3	Fertigung eines Hohlkerns am Beispiel eines Serienbauteils (Iteration 1)	78



15.3.1	Material	78
15.3.2	Vorbereitung.....	79
15.3.3	Durchführung	79
15.3.4	Ergebnis.....	81
15.4	Versuche zur CO ₂ Speicherung der Eiskerne.....	83
15.4.1	Versuchsaufbau	83
15.4.2	Durchführung	84
15.4.3	Ergebnisse	85
15.4.4	Bewertung.....	85
15.5	Fertigung eines Hohlkerns am Beispiel eines Serienbauteils (Iteration 2)	86
15.5.1	Anpassungen am Versuchsaufbau und Durchführung.....	86
15.5.2	Ergebnisse	86
15.5.3	Fazit	87
15.6	Folienversuche gegen Anhaftung.....	87
15.6.1	Versuchsablauf	88
15.6.2	Ergebnisse	88
15.7	Trennmittelversuche gegen Anhaftung.....	90
15.7.1	Versuchsablauf	90
15.7.2	Ergebnisse	91
15.8	Abguss eines mit Eiskernen geformten Hohlkernes	92
15.8.1	Vorbereitung der Gießform.....	92
15.8.2	Abguss und Untersuchung	93
15.8.3	Untersuchung der Porosität.....	95
15.9	Fazit zur Herstellung von Hohlkernen mittels Eiskernen.....	97
16	Einsatz von 3D gedruckten Hohlformern aus thermoplastischen Elastomeren (TPE).....	98
16.1	Herstellung der Hohlformer	98
16.2	Versuchsdurchführung	99
16.3	Ergebnisse.....	100

16.4	Geometrievariationen.....	101
17	Reduzierung des CO2-Fußabdruckes durch Hohlformer	103
18	Zusammenfassung	105



1 Kurzfassung des Gesamtvorhabens

Obwohl anorganische Kernherstellungsverfahren aus Umweltschutz- und Gesundheitsschutzgründen zwingend in der Gießerei eingeführt werden müssen, ist die tatsächliche Anwendung dieser Systeme zur Zeit auf ein relativ enges Feld begrenzt, insbesondere in der Herstellung von Aluminiumkokillengussteilen und wenigen Anwendungen in anderen Bereichen. Das geplante Vorhaben will hier mit der Entwicklung eines neuartigen anorganischen Kernpaketverfahrens einen Beitrag zur verstärkten Verbreitung dieser Technologie leisten. Genutzt werden soll dabei die aus dem (organischen) Maskenformverfahren bekannte Technologie der Herstellung von Hohlkernen. Gemäß des Standes der Technik werden anorganische Kerne heute durch Trocknung verfestigt. Dabei ist Energie nötig, die entweder über ein temperiertes Urformwerkzeug, erwärmte Luft oder Mikrowellentechnik in den Formstoff eingebracht wird. Durch die angestrebte Herstellung von Hohlkernen soll der Energiebedarf im Vergleich zur üblichen Produktion von Vollkernen deutlich gesenkt werden. Diese Energieeinsparungen sollen durch die Erstellung einer Ökobilanz des entwickelten Verfahrens nachgewiesen werden.



2 Angaben zum Antragsteller und der Kooperationspartnern

2.1 Antragsteller:

Peak Deutschland GmbH, Dresdner Straße 58, 1683 Nossen

Produkte:

- Binder und Härter für das Wasserglas-CO₂- und das Wasserglas-Ester-Verfahren
- Kernbinder für neuentwickeltes und weltweit patentiertes Verfahren zur Kernherstellung mit Warmluftbegasung (insbesondere geeignet zum Einsatz im Eisenguss)
- Bindemittel für feuerfeste Massen, Zustellung von Öfen, Pfannen, Tiegeln oder Rinnen
- Bindemittel für geotechnische Anwendungen

Qualifikation des Antragstellers:

Die Firma Peak Deutschland GmbH befaßt sich seit ihrer Gründung im Jahr 2006 mit der Entwicklung und der Anwendung von umweltfreundlichen anorganischen Bindemitteln für Gießereianwendungen. Grundlage für diese Tätigkeit bildete u.a. die vorherige Lehr- und Forschungstätigkeit zweier Firmengründer im gleichen Bereich . Die Ergebnisse dieser Tätigkeiten sind einer Reihe von Publikationen veröffentlicht worden und belegen die entsprechende Kompetenz zur Durchführung des geplanten Vorhabens.

Projektleiter bzw. Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Polzin

Tel.: 035242 – 656595

Mobil: 0172 – 3503100

Fax. 035242 -656596

E-Mail: gp.polzin@icloud.com



2.2 Kooperationspartner 1:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München
für Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV,
Lichtenbergstraße 15, 85748 Garching

Geschäftsfelder und Qualifikation:

- Engineering. Produktion. Multimateriallösungen.
- Intelligente Vernetzung der Produktion
- Flexibilisierung der Produktion
- KI in der Produktion
- Additive Fertigung
- CFK-Fertigungstechnologien
- Sand- und Kokillengießen
- Multimateriallösungen
- Materialien und Prüftechnik
- Modellbildung und Simulation
- Online-Prozess-Monitoring und qualitätsgesicherte Prozessketten
- Effizienz und Bilanzierung
- Recycling
- Technologieberatung und -implementierung

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Daniel Günther

Abteilungsleiter

Email: daniel.guenther@igcv.fraunhofer.de

Tel./ Mobil: +49 (0)152 / 21816163

Fax: +49 (0)89 / 289 - 13738



2.3 Kooperationspartner 2:

Pinter Guss GmbH, Brunnwiesenstraße 2, 94469 Deggendorf

Produkte:

Herstellung von Sand und Kokillenguss aus Aluminium und Kupferlegierungen für den Maschinen- und Anlagenbau, Medizin-, Antriebs-, Pumpen- und Energietechnik sowie Sonder-, Landmaschinen-, und Nutzfahrzeugbau.

- Konstruktionsberatung und Simultaneous Engineering: Unterstützung der Kunden in der Gießgerechten Gestaltung von Bauteilen
- Simulationen zur Konstruktions- und Prozessoptimierung: Erstellung von Formfüllungs- und Erstarrungssimulationen zur Kostenminimierung in der Bemusterung
- Reverse Engineering: Neuauflage alter Bauteile ohne Zeichnungsdaten

Qualifikation des Kooperationspartners:

Die Firma PINTER GUSS GmbH ist ein mittelständisches Gießereiunternehmen mit mehr als 100-jähriger Erfahrung. Als Unternehmen mit einer stetigen Entwicklung, einer modernen Ausstattung und hoher Innovationskraft betätigt sich PINTER seit Jahren gemeinsam mit universitären Partnern in der Forschung und Entwicklung gießereitechnischer Fragestellungen. Die Umsetzung von Forschungsprojekten wird durch Ingenieure mit fachlicher Ausbildung der Gießereitechnik durchgeführt.

Ansprechpartner:

Joshua Bissels Wirt.-Ing.M.Sc.RWTH

Leiter Innovation und Prozessentwicklung

E-Mail: joshua.bissels@pinterguss.de

Tel: 099132018861

Fax: 09913201820

www.pinterguss.de



3 Umweltrelevanz

Die Fertigung von gegossenen Bauteilen aus den verschiedenen technisch wichtigen Gusswerkstoffen (Eisen, Stahl, Aluminium, Magnesium, Kupfer...) wird heute zum Großteil mit Gießtechnologien mit verlorenen Formen, besser bekannt als „Sandformen“ realisiert. Diese Formen (im Falle der Außenkonturen des Gussteils) und Kerne (zur Darstellung der Innenkonturen) werden im Wesentlichen aus einem körnigen Formgrundstoff (meist Quarzsand) und einem Bindemittel hergestellt. Auf der Seite der Bindemittel finden heute weitverbreitet organische Binder auf Kunstharzbasis Anwendung. Diese meist auf Erdölbasis produzierten Binderkomponenten setzen nach ihrer energieintensiven Herstellung im gesamten Prozess der Gussteilfertigung umwelt- und gesundheitsschädliche Reaktionsprodukte frei, dies sind z.B. BTX, PAK, Phenol u.a. Die aus diesen Verfahren anfallenden (gem. KrW „produzierten“) Abfälle stellen sehr häufig besonders überwachungsbedürftige Abfälle („Sondermüll“) dar, die entweder auf dafür zugelassenen Deponien entsorgt oder aufwändig thermisch nachbehandelt werden müssen.

Durch den geplanten Einsatz anorganischer Binder werden gesundheits- und umweltschädliche Emissionen nahezu um 100% reduziert, da hier lediglich die Entstehung von Wasserdampf zu erwarten ist. Die entstehenden Abfälle sind unschädlich und können auf Deponien für Siedlungsabfälle (Deponieklasse I) abgelagert oder gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz in anderen Bereichen wiederverwertet werden, Beispiele dafür sind der Straßenbau, die Zementindustrie oder die Betonherstellung.

Durch den geplanten Einsatz von Hohlkernen wird zudem die Formstoffmenge deutlich reduziert (schätzungsweise um 60 bis 80%), was einen erhöhten Ressourcenschutz und letztendlich auch eine bessere Gussteilqualität bedeutet. Zusammenfassend sind aus dem Projekt folgende Verbesserungen hinsichtlich des Umweltschutzes zu erwarten:

- Minimierung von gesundheitsschädlichen Emissionen im Produktionsprozess um nahezu 100% im Vergleich zu organisch gebundenen Kernen
- Vermeidung gefährlicher und schwer deponierbarer bzw. teurer nachzubehandelnder fester Abfälle
- Ressourcenschutz durch Einsatz von Hohlkernen sowie durch Wiederverwertung anfallender Altsande in anderen Industriebereichen
- Energieeinsparung in der Produktion von Hohlkernen im Vergleich zu Vollkernen
- Einsparung von Erdöl bzw. größere Unabhängigkeit der Industrieproduktion vom Erdöl



4 Zielsetzung des Vorhabens

Die breite Etablierung der umweltfreundlichen anorganischen Bindersysteme in der Gussproduktion ist bisher an mehrheitlich technischen Problemen gescheitert, beispielhaft zu nennen hier sind zu lange Takt- bzw. Härtezeiten, begrenzte Lagerfähigkeit hergestellter Formteile oder schlechtes Auspackverhalten nach dem Gießen. Diese und ggf. andere zu erwartende Probleme sollen durch die geplanten Arbeiten des Projektes vermieden werden. Der Hauptansatz dazu sieht vor eine Technologie zur Herstellung von anorganisch gebundenen Hohlkernen zu entwickeln. Hohlkerne benötigen weniger Formstoff als Vollkerne, haben kürzere Herstellungszeiten und kollabieren nach erfolgtem Abguss besser. Die Entwicklung einer dazu geeigneten Kernschießtechnologie steht daher im Mittelpunkt der geplanten Arbeiten. Ein wichtiger Punkt ist die angestrebte Vermeidung der Notwendigkeit von zwei oder mehr Einzelkernwerkzeugen („Kernkasten“) und die Montage der Hohlkerne aus Einzelsegmenten. Durch die Ermittlung und Charakterisierung aller relevanten Eigenschaften entlang der Prozesskette soll dieses Verfahren sicher anwendbar werden. Eine Ökobilanz des entwickelten Verfahrens soll am Ende des Projektes die positiven Effekte des Verfahrens belegen. Obwohl anorganische Kernherstellungsverfahren wie bereits dargestellt aus Umweltschutz- und Gesundheitsschutzgründen zwingend in der Gießerei eingeführt werden müssen, ist die tatsächliche Anwendung dieser Systeme zur Zeit auf ein relativ enges Feld begrenzt, insbesondere in der Herstellung von Aluminiumkokillengussteilen mit wenigen Anwendungen in anderen Bereichen. Das geplante Vorhaben will hier mit der Entwicklung eines neuartigen anorganischen Kernpaketverfahrens einen Beitrag zur verstärkten Verbreitung dieser Technologie leisten. Genutzt werden soll dabei die aus dem (organischen) Maskenformverfahren bekannte Technologie der Herstellung von Hohlkernen zur Anwendung kommen. Durch die neue Technologie soll auch Eisengießereien (etwa 350 der ca. 600 deutschen Gießereien) eine anwendbare anorganisch basierte Kernherstellungstechnologie erschlossen werden. Gemäß des Standes der Technik werden anorganische Kerne heute durch Trocknung verfestigt. Dazu ist Energie nötig, die entweder über ein temperiertes Urformwerkzeug, erwärmte Luft oder Mikrowellenenergie in den Formstoff eingebracht wird. Durch die angestrebte Herstellung von Hohlkernen soll der Energiebedarf im Vergleich zur üblichen Produktion von Vollkernen deutlich gesenkt werden. Diese Energieeinsparungen sollen durch die Erstellung einer Ökobilanz des entwickelten Verfahrens nachgewiesen werden. Durch die Charakterisierung der erzielbaren Kerneigenschaften entlang der gesamten Prozesskette wird sichergestellt, dass das Verfahren die gewünschten technologischen Eigenschaften besitzt.



5 Stand der Technik

Das Gießen von flüssigen Metallen in eine Form ist eine der schnellsten und effektivsten Technologien um ein Bauteil herzustellen [7]. Bei den Formen unterscheidet man solche für den einmaligen („verlorene“) und solche für den mehrmaligen („Dauerformen“) Gebrauch. Um Hohlräume und komplizierte Konturen im Gussteil zu erzeugen, werden Kerne in die Form eingelegt. Sowohl die verlorenen Formen als auch die Kerne bestehen aus einem Formgrundstoff, einem Formstoffbindemittel sowie speziellen Zusatzstoffen. Um der Form beim Gießen eine ausreichende Festigkeit zu verleihen, müssen daher geeignete Bindemittel hinzugefügt werden. Dies können organische (z.B. Furan- oder Phenolharze) oder anorganische (Ton, Wasserglas, Zement) Bindemittel sein. Die Verfestigung von wasserglasgebundenen Formstoffen in temperierten Formwerkzeugen, d. h. Kernkästen, ist schon lange bekannt. Sicherlich wurden in den Hochzeiten des Hot-Box-Verfahrens hin und wieder auch anorganische (Wasserglas-)Kerne in den vorhandenen metallischen Urformwerkzeugen für die Kernherstellung produziert. Obwohl die erzielbaren Festigkeiten mit denen des Hot-Box-Verfahrens konkurrieren können, hat sich das „Wasserglas-Hot-Box-Verfahren“ nicht durchgesetzt. Neben dem hohen Energieaufwand für die Fertigung dürften Überlegungen zum Zerfallsverhalten bei der Trennung Gussteil / Formstoff zu dieser Zeit eine wichtige Rolle gespielt haben. Mit dem Wiederaufleben des Interesses an den anorganischen Bindersystemen sind insbesondere die warmhärtenden Verfahrensvarianten wieder verstärkt in den Mittelpunkt der des Interesses getreten.

Bereits 1985 befasst sich *Svensson in* [1] mit der CO₂-Härtung von Wasserglasbindern, stellt aber auch fest, dass die Trocknung nach dem Warm-Box-Verfahren mit Ergänzung durch Kohlendioxidbegasung gute Ergebnisse bringt. *Osterberg* und *Anderson* berichten in [2] über das Saab-Scania-Verfahren, bei dem eine Wasserglas-Sand-Mischung in 130–150 °C warme Kernkästen geschossen und anschließend 120 Sekunden mit 170–190 °C warmer Luft oder abwechselnd mit warmer Luft und Kohlendioxid begast wird. Das Verfahren brachte mit 2,4 bis 3,2 % Binderzugabe gute Festigkeiten, der Formstoff war ausreichend fließfähig und zeigte ein gutes Zerfallsverhalten.



In anderen Untersuchungen stellten *Flemming u. a.* [3] fest, dass im Hinblick auf eine möglichst vollständige Nutzung der Bindeeigenschaften von Wasserglasbindern bei der Dehydratation infolge der Ausbildung kompakter Binderhüllen die besten Ergebnisse erzielt werden. Es wird auch darauf hingewiesen, dass bei der Verwendung modifizierter Natrium-Wassergläser der Einsatz einer Warm-Box-Technologie mit Bindergehalten um 3 % vorteilhaft ist. In [4] und [5] führen *Döpp, Schneider u. a.* Versuche durch, in denen sie den Formstoff in warme Kernkästen schießen. Die bei Raumtemperatur hergestellten Kerne werden mit solchen verglichen, die in einem 50, 100, 150 und 200 °C warmen Kernkasten hergestellt wurden. Nach dem Schießen führen die Verfasser eine zusätzliche Begasung mit Kohlendioxid durch, wobei die Bindergehalte bei 2; 2,5 und 3 % liegen und Kerne für Motorrad-Zylinderköpfe hergestellt werden.

Bei einem Bindergehalt von 2 % konnten jedoch keine ausreichenden Festigkeiten mehr ermittelt werden. Ebenfalls mit heißem Kernkasten arbeiten *Doroschenko* und *Makarevitsch* in [6]. Sie stellen mit 2 % Wasserglas Formmasken und Kerne her, die eine Zugfestigkeit von mehr als 2 MPa besitzen. Mit dem Wasserglas-Hot-Box-Verfahren beschäftigen sich ebenfalls *Marachovec* und *Lemkow* in [7]. Dabei verwenden sie einen Binder, der mit Alkalisalzen, Salzen der Tripolyphosphorsäure und siliziumorganischen Verbindungen modifiziert ist. Die Kernkastentemperaturen liegen bei diesen Untersuchungen zwischen 180 und 240 °C.

Beginnend mit der GIFA 2003 wurden seitens verschiedener Bindemittelhersteller Arbeiten zur Entwicklung neuer warmhärtender Bindersysteme vorgestellt, die bis heute andauern. Grundlage dieser Entwicklungen war die bekannte Tatsache, dass durch temperierte Formwerkzeuge wasserglasgebundene Formstoffe zu deutlich höheren Festigkeiten gebracht werden können als beispielsweise bei der klassischen Kohlendioxidbegasung. Diese hohen Festigkeiten wurden als grundlegende Anforderung an anorganische Bindersysteme gestellt, da einer der Hauptimpulse zu dieser Entwicklung von der Automobilindustrie kam und damit von der Großserienfertigung von teilweise hochkomplexen und filigranen Kernen für Fahrzeugkomponenten ausging.



Der aktuelle Stand der Technik stellt sich nach wie vor so dar, dass üblicherweise ein silikatbasiertes Bindersystem mit dem Formgrundstoff vermischt und in ein auf 160 – 200°C temperiertes Kernherstellungswerkzeug geschossen wird, in dem eine stabile Randschale gebildet wird. Durch eine Kombination mit einer Warmluftbegasung können die Taktzeiten in vertretbare Bereiche gebracht werden. Der Hauptnachteil dieser Verfahren besteht darin, dass sie aufgrund der hohen Werkzeug- und Energiekosten ausschließlich in der Großserienkernfertigung (i.d.R. im Automobilguss) eingesetzt werden können.

Außerdem beschränkt sich die Anwendung aufgrund verschiedener unzureichender technologischer Eigenschaften (z.B. Restfestigkeiten / Zerfallsverhalten) auf die Herstellung von Aluminiumgussteilen. Einen nach wie vor weitgehend gültigen Überblick über diese Verfahren gibt [8].

Mit der Entwicklung eines neuen anorganischen Bindersystems soll Eisengießereien, die in vielen Fällen Kundengießereien mit häufig wechselnden Sortimenten sind eine Möglichkeit zum Einsatz anorganisch gebundener Kerne gegeben werden. Wesentlicher Aspekt dabei ist der Wegfall eines teuren beheizten Kernherstellungswerkzeuges aus Stahl, welches nur in der Grossserienfertigung zu rechtfertigen ist. Bei dem eingesetzten Bindersystem handelt es sich um ein Bindemittel auf Alkalisilikat- bzw. Wasserglasbasis, welches mit einer ganzen Reihe von Oxiden modifiziert wurde und keinerlei organische Bestandteile enthält. Die Verfestigung des Formstoffs erfolgt hierbei ausschließlich durch eine Begasung mit ca. 160°C warmer Luft. Das Bindemittel ist ein Einkomponentenbinder, welcher ohne zusätzliche Additive in Bereichen von weniger als 2,5%, in vielen Fälle unter 2% dosiert werden kann [9], [10].



6 Innovativer Charakter des Projektes

Folgende Punkte beschreiben den innovativen Charakter des geplanten Vorhabens:

- Anorganische Binder werden heute nur in der Großserienfertigung von Aluminiumkokillengussteilen eingesetzt
- Das neue Verfahren wird im Sandguss, auch für mittlere und geringe Stückzahlen einsetzbar sein
- Das Verfahren wird in Eisengießereien einsetzbar sein (ca. 350 der etwa 600 deutschen Gießereien)
- Hohlkerne bilden heute die Ausnahme, lediglich das (organisch gebundene) Maskenformverfahren arbeitet heute mit Hohlkernen
- durch das neue Verfahren sind deutliche Verbesserungen der Umweltfreundlichkeit, des Gesundheitsschutzes, der Energieeffizienz und der Ressourcenschonung im Prozess der Gussteilerzeugung zu erwarten
- dadurch wird ein Beitrag zur Sicherung der Zukunftsfähigkeit der deutschen Gießereiindustrie geleistet



7 Energieeinsparung

Bei warmhärtenden Kernherstellungsverfahren wie dem Hot Box- oder dem Maskenformverfahren wird der Kernkasten auf 200 – 300°C aufgeheizt und permanent auf dieser Temperatur gehalten. Bei den beiden anorganischen Kernherstellungsverfahren Inotec und Cordis wird der Kasten auf 180 - 220°C aufgeheizt und man spült anschließend noch mit ca. 160°C Warmluft.

Beim Bindersystem Cast Clean VC arbeitet man mit unbeheizten Kernkästen und Warmlufthärtung bei Temperaturen zwischen 120 und 160°C. Bei Verwendung von sehr trockener Luft sowie von Unterdruck kann diese Temperatur u.U. noch weiter gesenkt werden. Dieses System soll im Projekt eingesetzt und weiterentwickelt werden.

Der Primärenergiebedarf bei der Verwendung des anorganischen Bindersysteme Inotec im Vergleich zum kalthärtenden PUR-Cold-Box-Verfahren beträgt nach [11] ca. 80% bezogen auf die gesamte Kernfertigung mit Regenerierung des Altsandes. Bei der im Projekt angestrebten Hohlkernfertigung sollte der Energiebedarf auf deutlich unter 80% sinken.

Aus [12] kann man abschätzen, dass der jährliche Bedarf an Kernbindern in Deutschland etwa 28.000 t beträgt (bei mittlerer Binderdosierung 1,5%). Dieser Bedarf setzt sich zur Zeit aus über 90% organischen und dem Rest anorganischen Bindern zusammen. Das Substitutionspotential dieser organischen durch anorganische Bindemittel mit allen damit zusammenhängenden Umweltverbesserungen wird deutlich.

Von diesen etwa 28.000 t Bindemittel kann man auf ca. 1,8 Mio.t Kernsand schließen, der heute fast ausschließlich als Neu(quarz-) sand zum Einsatz kommt. Wenn man nun mit nur 40% Sandeinsparung durch die Verwendung von Hohlkernen rechnet (ein Hohlkern benötigt 10-20% Formstoff im Vergleich zum Vollkern), ergibt sich daraus eine jährliche Einsparung von 720.000 t Neusand alleine für Deutschland. Hinzu kommt der regenerierte und wiedereingesetzte Altsand, der zu einer noch höheren Einsparung von Neusand führt.

Die Datenlage im Bereich Energieeinsparung, Ressourcenverbrauch, Abfallvermeidung und Emissionspotential ist leider unzureichend. Auch hier soll die am Ende des Projektes angestrebte umfassende Ökobilanz mehr Klarheit bringen.

8 Versuchsdurchführung IGCV

8.1 Herstellung von Sandkernen für den Metallguss

Bei kernintensiven Gießverfahren werden organisch oder anorganisch gebundene Sandkerne zur Herstellung komplexer Hohlstrukturen in Metallgussprodukten eingesetzt [1]. Zwei gängige Verfahren zur Herstellung eines Sandkerns ist das Kernschießen [2], bei dem das Sand-Binder-Gemisch durch Luftdruck fluidisiert und in ein Kernwerkzeug geblasen wird, oder durch 3D-Druck [3], bei dem das Bindemittel selektiv Schicht für Schicht in das Sandbett gedruckt wird (Abbildung 8-1). Der Sandkern wird nach dem Erstarren der Metallschmelze aus dem Gussteil entfernt. Das Entfernen sogenannter verlorene Kerne aus dem Gussteil wird als Entkernen bezeichnet [4]. Der Entkernprozess ist gekennzeichnet durch Hämmern und Rütteln [5].

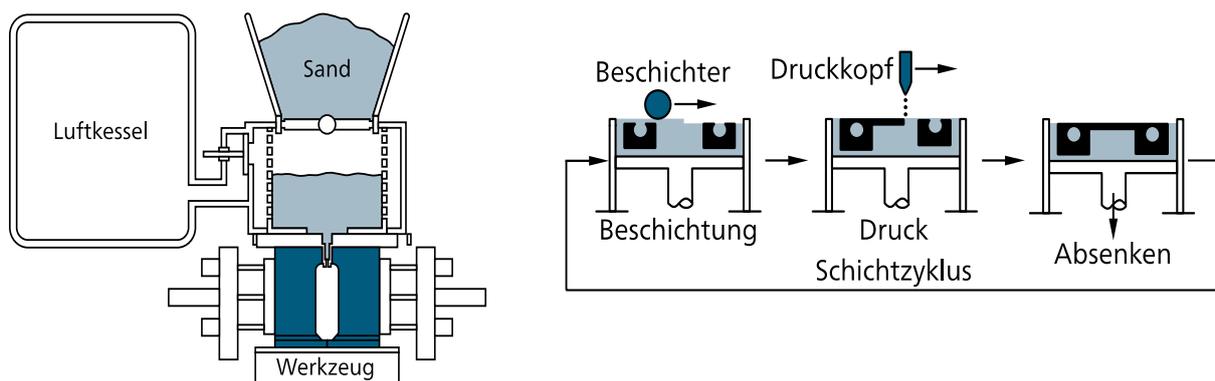


Abbildung 8-1: Technologien zur Kernherstellung: Kernschießen (links) und 3D-Druck (Binder-Jetting) (rechts).

Strengere Umweltgesetze geben den Impuls zur Umstellung auf umweltfreundlichere Fertigungstechnologien in der Europäischen Union [6]. Auch die Gießereiindustrie muss den Anforderungen einer umweltfreundlicheren Produktion gerecht werden. Bei kernintensiven Gießverfahren haben anorganische Bindemittel mehr Aufmerksamkeit seit der Jahrtausendwende erhalten und rücken somit wieder in den Fokus der Gießereiindustrie. In diesem Zusammenhang entwickeln Wasserglas-gebundene Sandkerne keine schädlichen Emissionen, da sie keine organischen Inhaltsstoffe enthalten. Allerdings ist das schlechte Entkernungsverhalten ein limitierender Faktor die Metallgussherstellung mit verlorenen Sandkernen aufgrund der hohen Restfestigkeit nach dem Gießen im Vergleich zu organisch gebundenen Kernen [7].



Eine Studie untersuchte das Entkernungsverhalten von Wasserglas-gebundenen Kernen im 3D-Druck. Hierbei wurden geometrisch künstliche Artefakte, wie z.B. Sollbruchstellen, in den Sandkern hineingedruckt. Die Ergebnisse zeigen, dass die erzeugten Artefakte im Sandkern zu einem besseren Entkernverhalten führen als Sandkerne ohne Artefakte [8]. Grundsätzlich ist es um 3D-Druck auch möglich, vollständige Hohlkerne zu erzeugen. Das Verfahrensprinzip zur Erzeugung von Hohlkernstrukturen im 3D-Druck kann nicht auf das Kernschießen übertragen werden. Um das Entkernverhalten von Wasserglas-gebundenen Kernen aus dem Kernschießprozess zu verbessern, müssen alternative Ansätze zur Verbesserung der Entkernbarkeit untersucht werden. An dieser Stelle greift das beantragte Forschungsprojekt ein.

8.2 Zielsetzung

Obwohl anorganische Kernherstellungsverfahren aus Umweltschutz- und Gesundheitsschutzgründen zwingend in der Gießerei eingeführt werden müssen, ist die tatsächliche Anwendung dieser Systeme zur Zeit auf ein relativ enges Feld begrenzt, insbesondere in der Herstellung von Aluminiumkokillengussteilen mit wenigen Anwendungen in anderen Bereichen. Zielsetzung dieses Projektes war es, eine Methodik zur Herstellung von Wasserglas-gebundenen Hohlkernen auf Basis der Kernschießtechnologie zu entwickeln. Hohlkerne sind für die Anwendung vorteilhaft. Sie benötigen weniger Bindereinsatz, die Hohlkontur kann das Entkernverhalten begünstigen sowie für die Gasabführung nützlich sein. Darüber hinaus bietet die Hohlkernherstellung über einen konventionellen Kernschießprozess eine Alternative zum 3D-Sanddruck. Darüber hinaus wird wasserglasgebundene Kerne werden über Trocknung verfestigt. Dabei ist Energie nötig, die entweder über ein temperiertes Urformwerkzeug, erwärmte Luft oder Mikrowellentechnik in den Formstoff eingebracht wird. Durch die angestrebte Herstellung von Hohlkernen soll der Energiebedarf im Vergleich zur üblichen Produktion von Vollkernen gesenkt werden. Diese Energieeinsparungen sollen durch die Erstellung einer Ökobilanz in Abhängigkeit der Verfahren nachgewiesen werden.

Die Prozessentwicklung zur Herstellung von Hohlkernen im Kernschießprozess umfasst folgende Ideen:

- Hohlkernerzeugung durch einen Folienkern oder eines Eiskern
- Hohlkernerzeugung durch einen Ziehkern oder Verwendung von Unterdruck

Bei der Idee Folienkern wird ein in Vakuumfolie „eingepackter“ unverfestigte Innenkern mit dem eigentlichen Kernformstoff ummantelt, der dem Kern dann auch die gewünschten Eigenschaften wie z.B. Festigkeit oder Oberflächenhärte verleiht. Der unverfestigte Innenkern



kann zur Einstellung zusätzlich gewünschter Eigenschaften wie Wärmekapazität oder Ausdehnungsverhalten genutzt werden und verbessert nach Abstellung des Vakuums das Zerfalls- und damit das Entkernverhalten.

Bei der Idee Eiskern soll der Innenkern gefroren werden und dann ähnlich wie bei der Idee Folienkern mit dem später verfestigten Hauptformstoff umschossen und anschließend wieder herausgelöst werden.

Bei der Idee Ziehkern handelt es sich um einen Ansatz, der ähnlich wie bereits beim Hot-Box-Verfahren angewendet wird. Dabei werden metallische Ziehdorne oder -teile in den Kernkästen verwendet, die nach der Kernherstellung gezogen und damit entfernt werden.

Bei der Hohlkernherstellung durch Unterdruck wird solange Unterdruck angelegt, bis eine ausreichend dicke Randschale des Kernes gebildet ist. Der dann noch nicht verfestigte und damit überschüssige Formstoff wird nach Abstellen des Unterdruckes aus dem Werkzeug entfernt. Über die Dauer des Unterdrucks kann soll hier die Kernwandstärke und damit die Eigenschaften des Kernes eingestellt werden.

9 Hauptteil

Prinzip der Hohlkernherstellung allgemein....

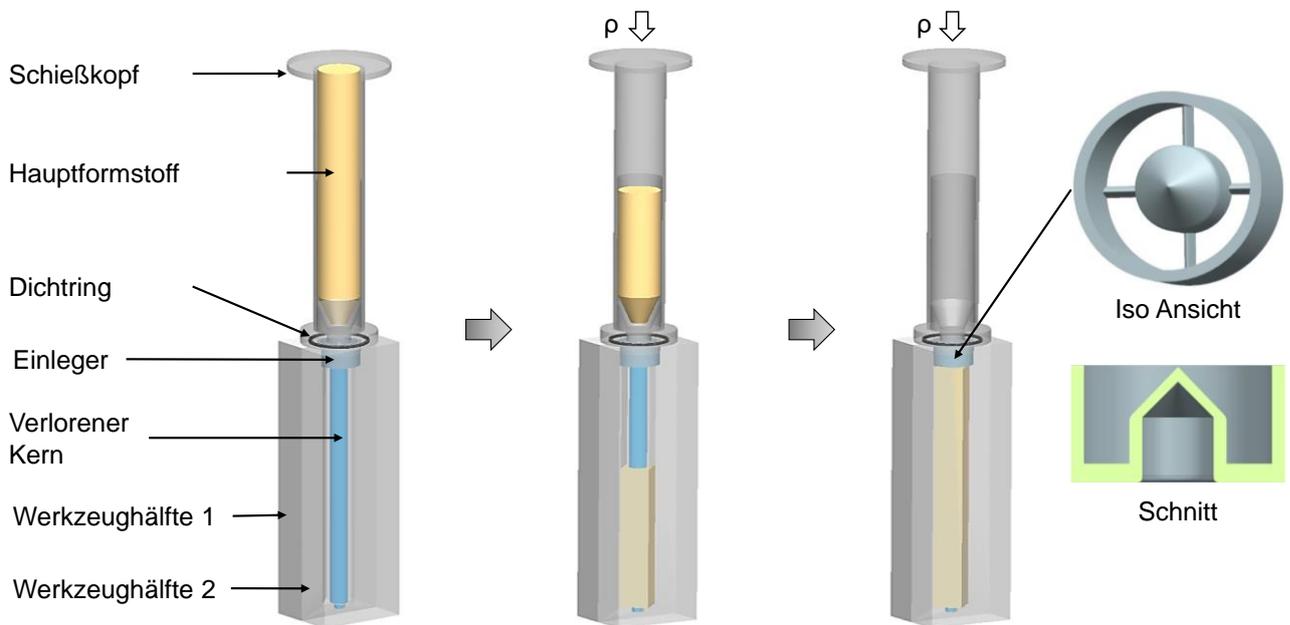


Abbildung 9-1: Grundlegender Ansatz zur Hohlkernerzeugung.

➔ Auf diesem Prinzip bauen alle weiteren Untersuchungen auf...

9.1 Arbeitspaket: Hohlkernerzeugung durch einen Folienkern

Die Methodik zur Herstellung eines Hohlkerns durch Einsatz eines Folienkerns wurde durch Vorversuche am Fraunhofer IGCV untersucht. Die nachfolgenden Darstellungen stellen die verschiedenen Untersuchungsansätze zusammenfassend dar.

Aluminiumfolie als Folienkern

Der Untersuchungsansatz zur Herstellung eines Hohlkerns mittels Aluminiumfolie als Folienkern ist in Abbildung 9-2 dargestellt. Hierbei bildet ein in Al-Folie umwickelter Holzdom die spätere Kavität für den Folienkern. In die Kavität wird ungebundener H32 Sand zur Stabilisation des Folienkerns eingefüllt. Anschließend wird der Folienkern mit Wasserglasgebundenem H32 Sand im Kernschießwerkzeug umschossen. Zur Aushärtung des Hauptformstoffes wird das gesamte Werkzeug in einem Ofen bei 200 °C für 20 min ausgelagert. Dabei verfestigt sich der Hauptformstoff und der lose Sand aus dem Folienkern

kann ausgeleert werden. Der Folienkern aus Al-Folie ließ sich nicht zerstörungsfrei aus dem Biegeriegelprüfkörper entfernen.

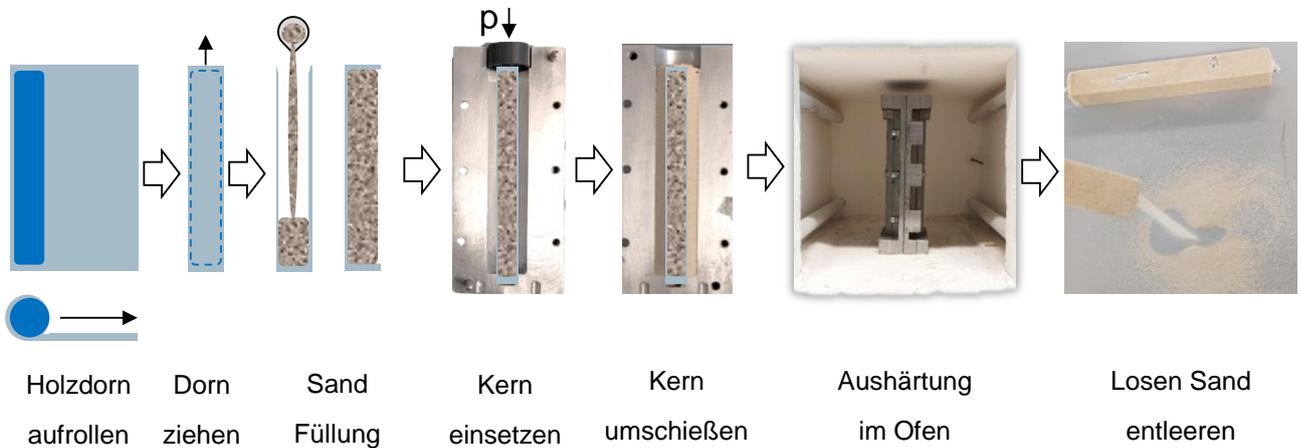


Abbildung 9-2: Untersuchungsansatz der Hohlkernerzeugung mittels Al-Folie als Folienkern.

Folienkern aus Silikonmasse

Ein weiterer Ansatz zur Hohlkernerzeugung wurde mittels Silikonmasse untersucht, Abbildung 9-3. Hierbei wurde ein gedruckter Sandkörper mit Silikonmasse umgossen um die Außenkonturen eines Folienkernes zu bilden. Anschließend wurde der gedruckte Dorn von der Silikonmasse entfernen und mit losen H32 Sandmaterial zur Stabilisation der Außenkontur gefüllt. Der Folienkern wurde mit selbsthärtendem organisch gebundenem Sand als Hauptformstoff umfüllt. Nachdem der Hauptformstoff ausgehärtet ist, kann der Folienkern aus dem Hauptformstoff entfernt werden. Auch hier, wie beim Folienkern aus Aluminium, konnte der Folienkern nicht zerstörungsfrei aus dem Hauptformstoff entfernt werden.

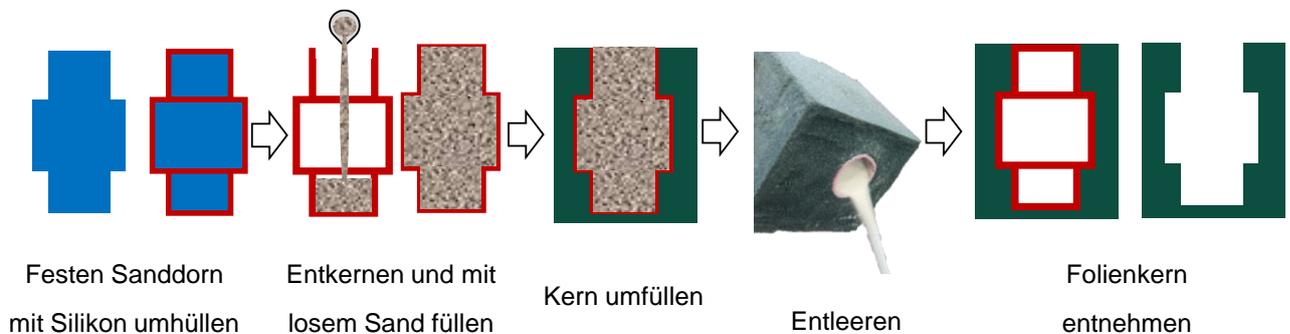


Abbildung 9-3: Untersuchungsansatz der Hohlkernerzeugung mittels Silikonmasse als Folienkern.

Laminierfolie als Folienkern

Abbildung 9-4 zeigt den Untersuchungsansatz mit Laminierfolie als Folienkern. Hierbei wird ein Holzdorn mit Laminierfolie ummantelt und in ein metallisches Werkzeug eingelegt. Das Werkzeug wird anschließend induktiv vorgewärmt. Nachdem beide Laminierfolien verklebt sind, kann der Dorn entnommen und loser H32 Sand in den Folienkern zur Stabilisierung der Außenkontur gefüllt werden. Anschließend wird der Folienkern im Kernschießprozess umschossen und der Hauptformstoff im Ofen ausgehärtet. Auch hier konnte der Folienkern nicht zerstörungsfrei aus dem Prüfkörper entnommen werden.

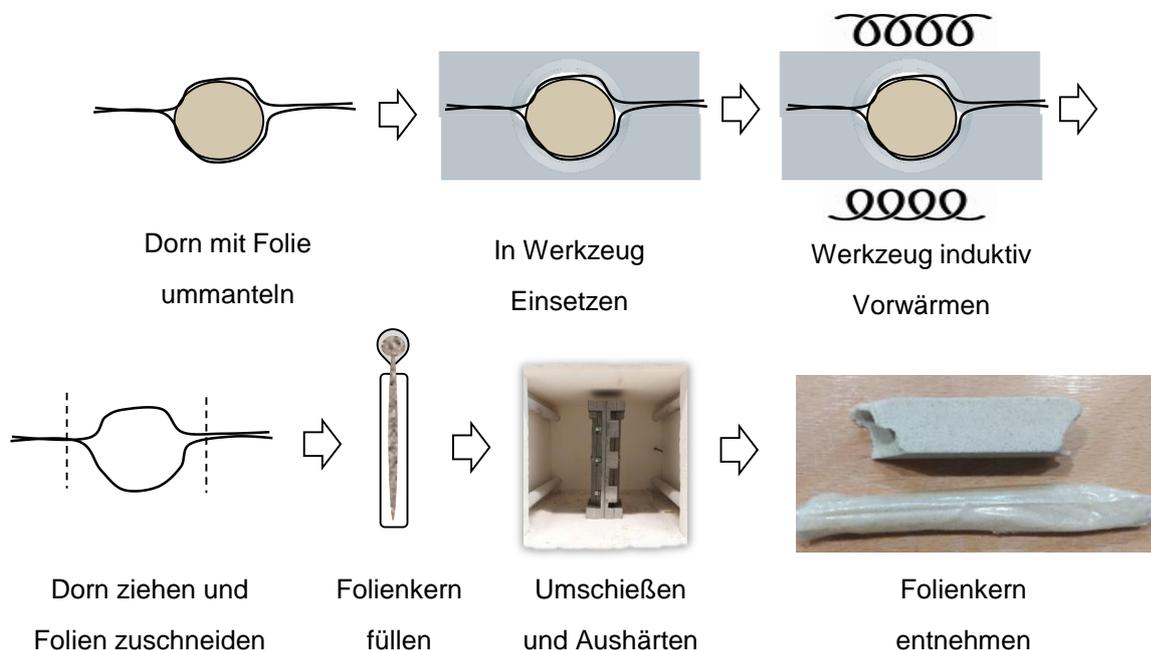


Abbildung 9-4: Untersuchungsansatz der Hohlkernerzeugung mittels Laminierfolie als Folienkern.

9.2 Arbeitspaket: Hohlkernerzeugung durch einen Eiskern

Die Methodik zur Herstellung eines Hohlkerns durch Einsatz eines verlorenen Eiskerns wurde am Fraunhofer IGCV konzipiert und entwickelt. Die nachfolgenden Darstellungen stammen aus bereits veröffentlichten Beiträgen.

- Christopher Locke (30.03.2023). Erzeugung von anorganisch gebundenen Hohlkernen mit Hilfe von verlorenen Eiskernen. Vortrag. 4. Formstoff-Forum 2023, Clausthal.



- Locke, C., Polzin, H., Bissels, J. et al. Production of Inorganic Hollow Cores Using Sacrificial Ice Cores. Inter Metalcast (2023). <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01101-x>

9.2.1 *Verwendete Materialien*

Abgeleitet von den Zielen des Vorhabens, werden zwei Materialsysteme verwendet. Das erste Materialsystem wird für die verlorenen Eiskerne verwendet und besteht aus Sand und Leitungswasser als Bindemittel. Das zweite Materialsystem besteht aus Sand und einem Wasserglasbindemittel das im Vergleich zum ersten System eine beständige Bindung zwischen den Sandpartikeln erzeugt.

Bei dem in dieser Studie verwendete Sand handelt es sich um einen handelsüblichen Quarzsand H32. Die mittlere Korngröße beträgt 320 µm (Quarzwerte GmbH, Frechen, Deutschland). Der Sand wird für den Primärkern (PK) und den verlorenen Eiskern (VE) verwendet. Zur Herstellung des PK wird H32 eine Minute lang mit einem flüssigen Wasserglasbinder vom Typ Cast Clean (Peak Deutschland GmbH, Nossen, Deutschland) oder einem trockenen Wasserglasbinder in Pulverform vom Typ Binder-S (Peak Deutschland GmbH, Nossen, Deutschland) vorgemischt. Zusätzlich wurde Leitungswasser dem trockenen pulverförmigen Bindemittel zugegeben. Zur Herstellung des VE wird H32 Sand eine Minute lang mit Leitungswasser vorgemischt. Tabelle 9-1 gibt einen Überblick über die verwendeten Mischungen.

Tabelle 9-1: Verwendete Mischungen.

Mischung	Sandtyp	Leitungswasser für VE (Gew.-%)	Flüssiger Wasserglasbinder (Gew.-%)	Pulverförmiger Wasserglasbinder (Gew.-%)	Leitungswasser für pulverförmigen Wasserglasbinder (Gew.-%)
VE	H32	2 / 4 / 6	-	-	-
PK	H32	-	1 / 2 / 3	-	-
PK	H32	-	-	6 / 8	3



9.2.2 Herstellung von Hohlkernen mittels verlorener Eiskerne

Das Prinzip der Hohlkernherstellung mittels Eiskern zeigte schematisch Abbildung 9-1. Dieser Prozess wird auf einer Morek LUT-1 Laborkernschießmaschine (Multiserw-Morek, Brzeźnica, Polen) durchgeführt. Die Herstellung von Hohlkernen umfasst die folgenden Schritte. Zunächst wird der Schießkopf mit dem PK-Material gefüllt und verdichtet. Anschließend wird der verlorene Eiskern (VE) in das Aluminiumwerkzeug eingesetzt und mit einem Einleger zentriert (siehe Abbildung 9-5). Der VE besitzt einen Durchmesser von 14 mm und eine Länge von 195 mm. Der Kernschießvorgang wird mit einer Schießzeit von 2 Sekunden und einem Druck von 5 bar durchgeführt. Dabei wird der PK um den VE geschossen.

Herstellung der VE

Abbildung 9-6 zeigt die Schritte zur Herstellung des VE. Die Anteile der VE-Mischung werden in einem Mischer eine Minute lang gerührt. Die VE-Mischung wird manuell in ein zweiteiliges Aluminiumwerkzeug gepresst und 24 Stunden lang bei -18 °C gekühlt. Ein Trennmittel vom Typ Demotex A (Technofond Gießereihilfsmittel GmbH, Harthausen, Deutschland) wird vorher auf das Aluminiumwerkzeug gesprüht. Nach Ablauf der 24 Stunden wird der VE ausgepackt und in das Kernschießwerkzeug eingesetzt. Der VE besitzt einen Durchmesser von 14 mm und eine Länge von 195 mm.

Anwendung des Verfahrens zur Herstellung von Hohlkernbiegeriegel

Die bisherigen Schritte veranschaulichen die das Kernschießen und die nachträgliche Weiterverarbeitung. Bei der nachträglichen Weiterverarbeitung wird das Kernschießwerkzeug in einen widerstandsbeheizten Laborofen bei 200 °C für 20 Minuten ausgelagert. Während dieses Prozesses härtet das wasserglasgebundene Kernmaterial aus. Gleichzeitig verliert der VE durch die Verdunstung des Wassers an Festigkeit. Das der Aushärtung kann der VE durch Ausgießen aus dem Werkzeug vom PK getrennt werden. Nach diesem Schritt kann der PK vom Werkzeug entfernt werden.

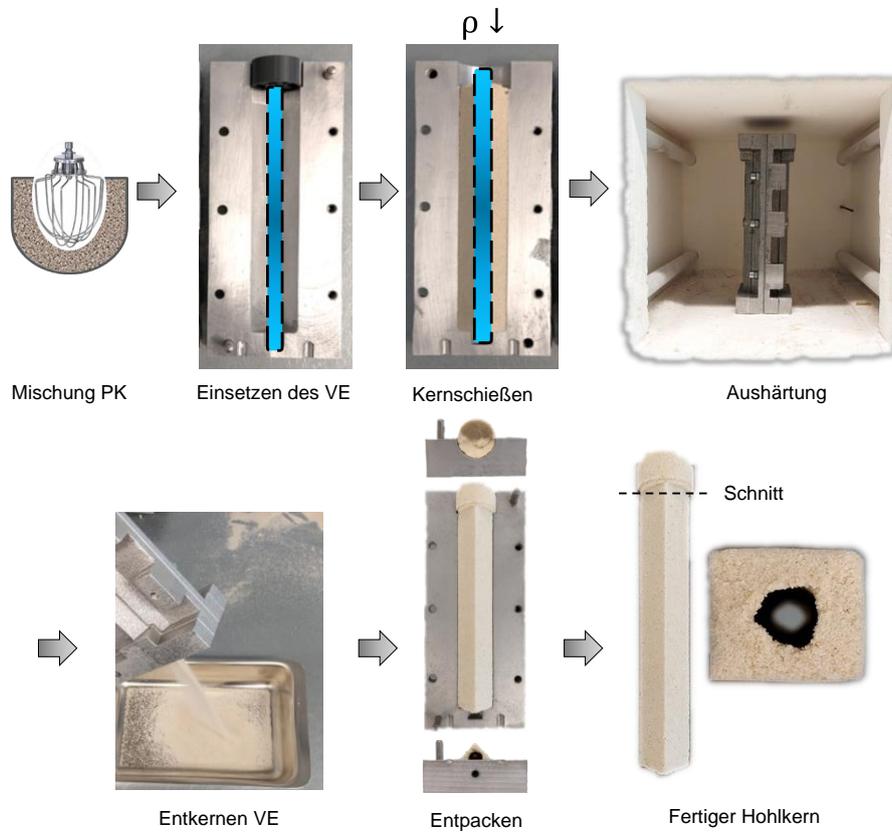


Abbildung 9-5: Prozessschritte zur Hohlkernerzeugung.

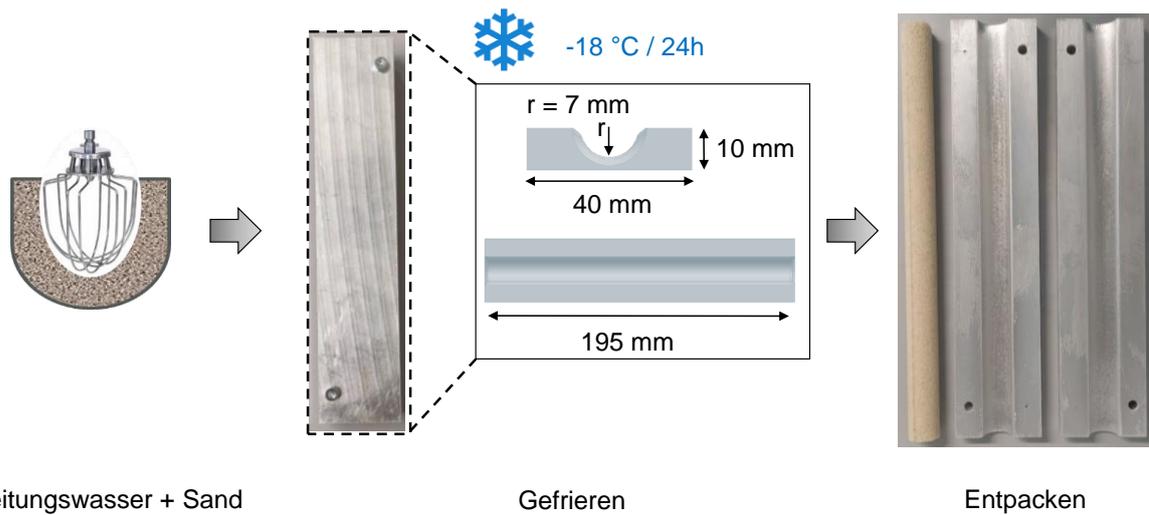


Abbildung 9-6: Herstellung des verlorenen Eiskerns.

9.2.3 3-Punkt-Biegeprüfung

Die 3-Punkt-Biegeversuche werden auf einer Zwick Universalprüfmaschine Z020 (ZwickRoell, Ulm, Deutschland) mit einer maximalen Prüfkraft von 20 kN zur Messung der Biegefestigkeit in N/cm² durchgeführt (Abbildung 9-7). Die Prüfungsgeschwindigkeit ist auf 1 mm/min eingestellt. Die Messung beginnt, bis eine Vorlast von 0,3 N erreicht ist. Der Auflagerabstand beträgt 150 mm. Die Prüfung endet, wenn eine Kraftabschaltswelle von 90 % der maximal gemessenen Prüfkraft erreicht ist. Die Außenabmessungen der Biegeriegel betragen 22,4 x 22,4 x 170 mm. Zum Vergleich wurden Referenzproben ohne Hohlraum herangezogen. Drei Proben werden pro Mischung für die Prüfung hergestellt.

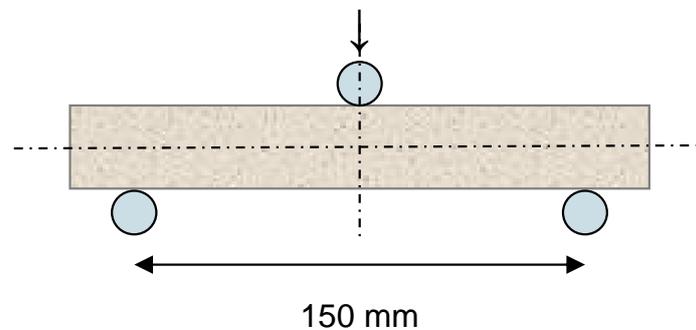


Abbildung 9-7: 3-Punkt-Biegeprüfung.

9.2.4 Überprüfung von Anhaftungen

Der Innendurchmesser des Biegeprüfstabs wird untersucht, um mögliche Anhaftungen zwischen dem VE und dem PK Material zu untersuchen. Abbildung 9-8 zeigt schematisch die Probenvorbereitung und die Messung der Innenkontur des Hohlkernbiegeriegels. Eine Probe von 20 mm Breite wird ausgeschnitten. Der Innendurchmesser und die Anisotropie werden für jede Probe viermal mit einem digitalen Messschieber bestimmt, um den Mittelwert und die Standardabweichung zu bestimmen. Für jede Mischung wurden zwei Proben gemessen. Eine Probe wurde von der Entlüftungsseite, die andere von der Einschussseite.

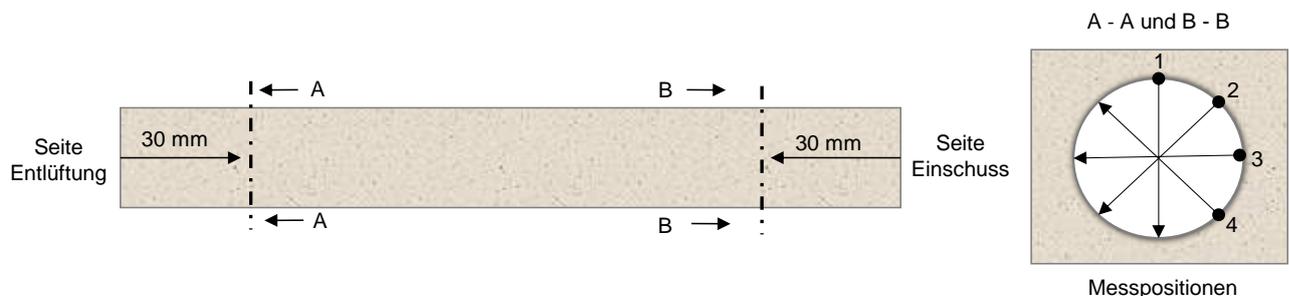


Abbildung 9-8: Schematische Darstellung der Probenpräparation und Messprinzip.

9.2.5 Messung des Entkernverhaltens

Das Entkernverhalten der eingegossenen Biegeriegel wurde gemäß dem Versuchsaufbau in Abbildung 9-9 durchgeführt. Das Gewicht des Stößels wird manuell mit einer Kurbel angehoben und fällt auf die Probe im freien Fall aus einer definierten Höhe. Der Stößel übt einen Impuls auf die eingespannte Probe aus. Der Impuls hängt von der Höhe und dem Gewicht ab. Die Höhe und das Gewicht des Stößels sind auf 50 mm und 6,8 kg festgelegt und resultiert in einer Energie von 3,3 Joule pro Stoß. Ein Federmechanismus sorgt dafür, dass die Rückfederung keinen weiteren Impuls pro Kurbelumdrehung auslöst. 20 Impulse werden als eine Schlagserie definiert. Vor dem Entkernen und nach jeder Schlagserie wird das Gewicht der Proben gewogen, um die Anzahl der benötigten Entkernimpulse zu bestimmen. Die Probe gilt als entkernt wenn der Sandkern vollständig entfernt ist. Das Entkernverhalten wurde an 3 Hohlkernbiegeriegeln mit der Zusammensetzung von 6 Gew.-% Leitungswasser im VE und 2 Gew.-% flüssigem Wasserglas, sowie an 3 Referenzbiegeriegeln ohne Hohlraum

mit 2 Gew.-% flüssigem Wasserglas untersucht. Die Gießtemperatur der Aluminiumschmelze wurde auf 750 °C eingestellt.

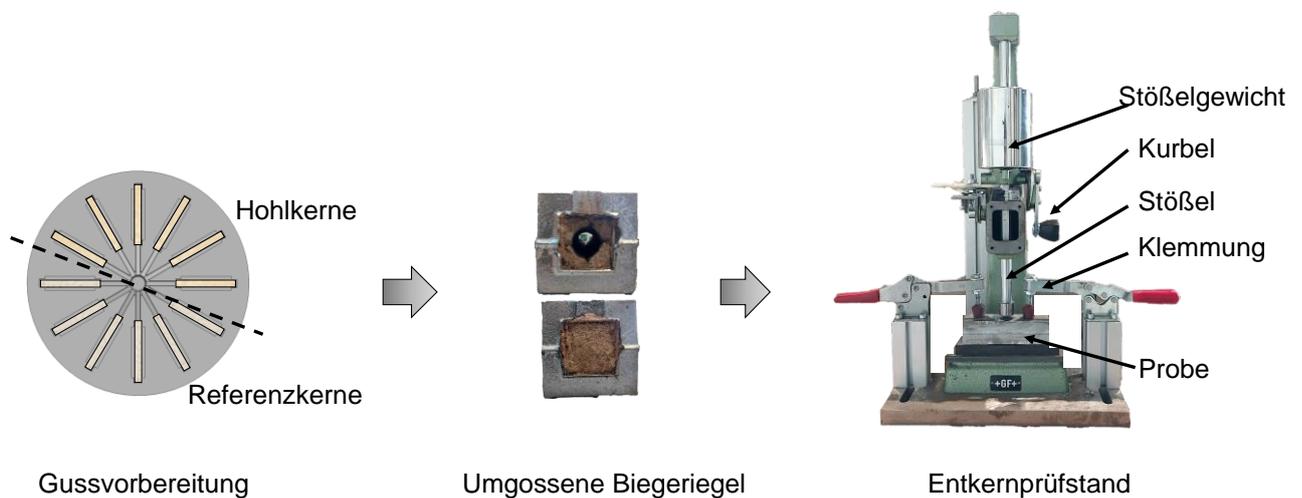


Abbildung 9-9: Herstellung und Prüfung von Entkernproben.

9.2.6 Herstellung eines Doppelrohrkerns als Anwendungsdemonstrator

Um das Anwendungspotenzial dieses neuartigen Verfahrens zu untersuchen, wurde ein Doppelrohrkern als Demonstrator ausgewählt, siehe Abbildung 9-10. Die VE-Mischung enthielt H32 Sand mit 6 Gew.-% Leitungswasser und die PK-Mischung enthielt H32 Sand mit 2 Gew.-% flüssigem Wasserglasbinder. Die Herstellung des Doppelrohrs erfolgt nach dem gleichen Prinzip und mit den gleichen Parametern wie im Abschnitt „Herstellung von Hohlkernen mittels verloreener Eiskerne“ beschrieben.

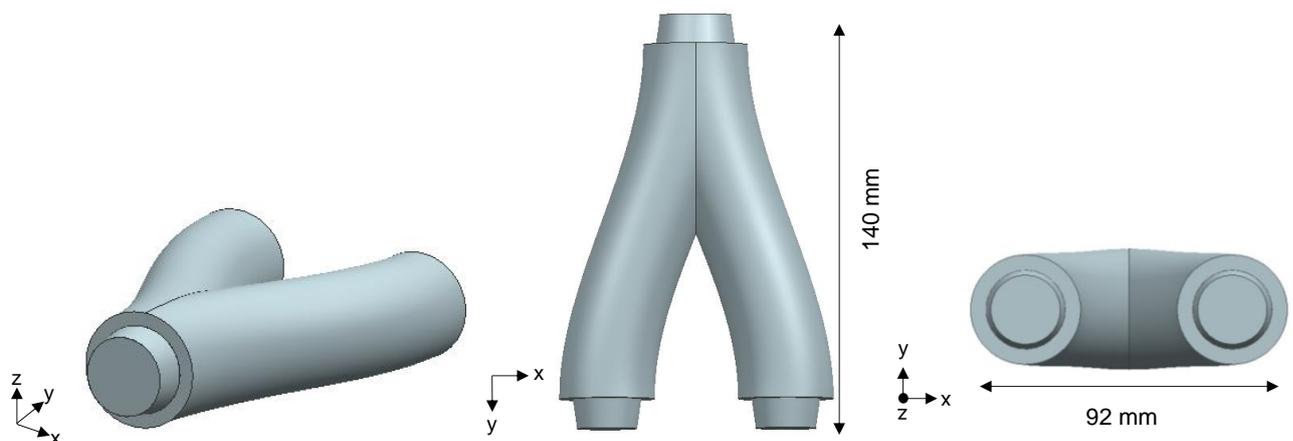


Abbildung 9-10: Doppelrohrkerndemonstrator.

9.2.7 Ergebnisse

Biegefestigkeit

Die Ergebnisse der Biegefestigkeitsprüfung der Hohlkerne im Vergleich zu den Referenzproben mit flüssigem oder trockenem Wasserglasbindemittel sind in Abbildung 9-11 und Abbildung 9-12 dargestellt. Die obere Linie des Boxplot-Diagramms stellt den Maximalwert, das x steht für den Mittelwert, die untere Linie für den Minimalwert und die Linie in der Box stellt den Medianwert dar. Für jede Mischung wurden drei Proben getestet.

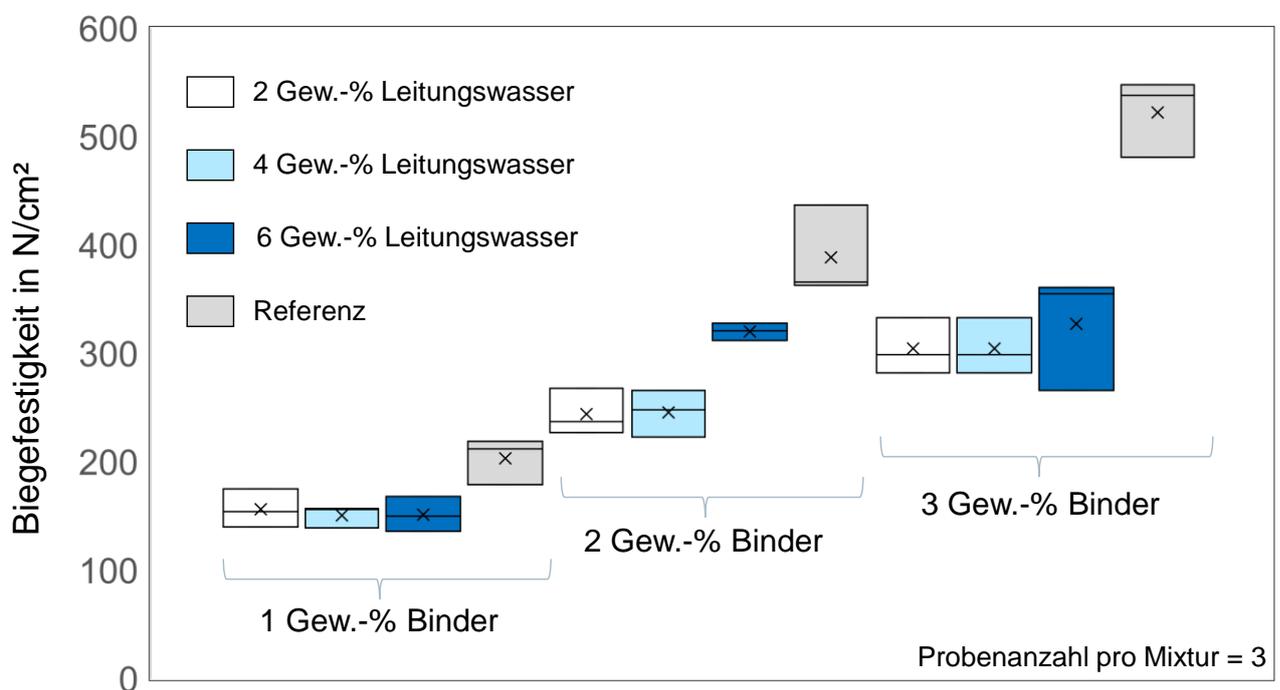


Abbildung 9-11: Biegefestigkeit von Proben mit flüssigem Wasserglasbinder.

Abbildung 9-11 zeigt, dass mit steigendem Gehalt an flüssigem Bindemittel von 1 bis 3 Gew.-% die Festigkeit der Hohlkerne und der Referenzproben zunimmt. Die Referenzproben weisen im Vergleich zu den Hohlproben eine deutlich höhere Festigkeit auf. Der Festigkeitsanstieg der Hohlkerne ist trotz unterschiedlicher Bindemittelzugabe moderat. Eine Ausnahme bildet der Hohlkörper mit 6 Gew.-% Leitungswasser und 2 Gew.-% Binder. Hier liegt die Festigkeit auf dem Niveau der Hohlkerne mit 3 Gew.-% Bindergehalt bei etwa 300 N/cm².

Die Biegefestigkeit der Hohlkerne mit pulverförmigen Wasserglasbinder in Abbildung 9-12 ist deutlich geringer als die Hohlkerne mit flüssigem Wasserglasbinder in Abbildung 9-11.

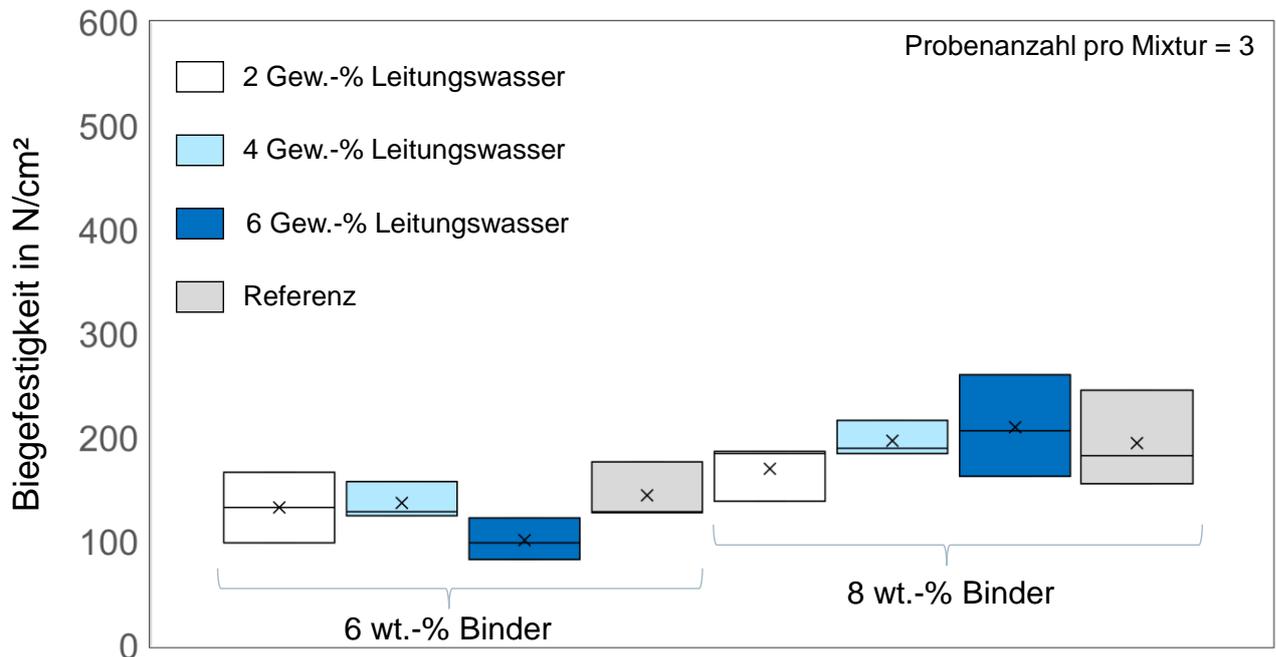


Abbildung 9-12: Biegefestigkeit von Proben mit trockenem pulverförmigem Wasserglasbinder.

Anhaftungen

Die Abbildung 9-13 und Abbildung 9-14 zeigen den gemessenen Durchmesser der Hohlkernbiegeriegel in Abhängigkeit von der Mixtur. Jeder Balken repräsentiert zwei Proben von einem Hohlkernbiegeriegel. Die Ergebnisse des flüssigen Wasserglasbinders zeigen, dass bei einem Bindergehalt von 1 Gew.-% der Hohlraum eine gute geometrische Genauigkeit zum VE aufweist. Im Gegensatz dazu nimmt der Durchmesser des Hohlkerns bei 2 und 3 Gew.-% Binderanteil deutlich ab. Die Verringerung des Innendurchmessers beträgt etwa 0,5 bis 1,5 mm. Eine Annahme wäre, dass ein Teil des verflüssigten Wassers aus dem VE in das PK-Material migriert und das Wasserglasbindemittel verdünnt. Das verdünnte Bindemittel bindet einen Teil der Sandpartikel aus dem VE, was zu einem kleinerem Durchmesser führt. Mit zunehmendem Wassergehalt im VE nimmt dieser Effekt ab, da die größere Menge an Leitungswasser das Bindemittel mehr zurückdrängt.

Im Falle des pulverförmigen Binders, gibt es keine deutliche Veränderung des Durchmessers in Abhängigkeit der Wasserzugabe im VE und Bindemittelmenge. Eine Vermutung ist, dass der pulverförmige Binder durch die zugegebene Wassermenge gesättigt ist und kein zusätzliches Wasser aus dem VE binden kann.

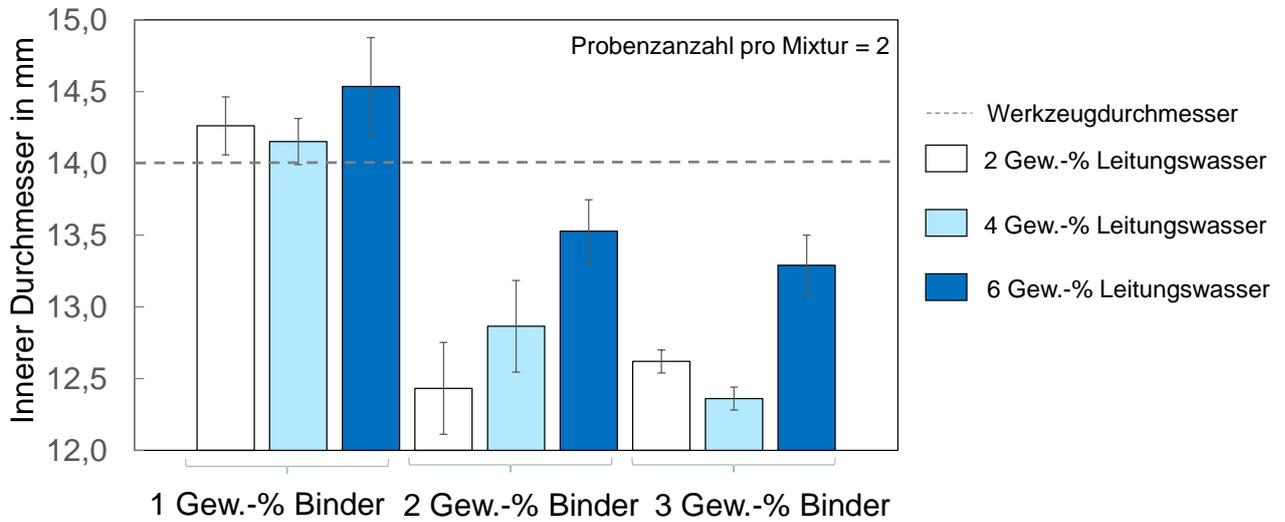


Abbildung 9-13: Gemessene Innendurchmesser von Hohlkernen mit flüssigem Wasserglasbinder.

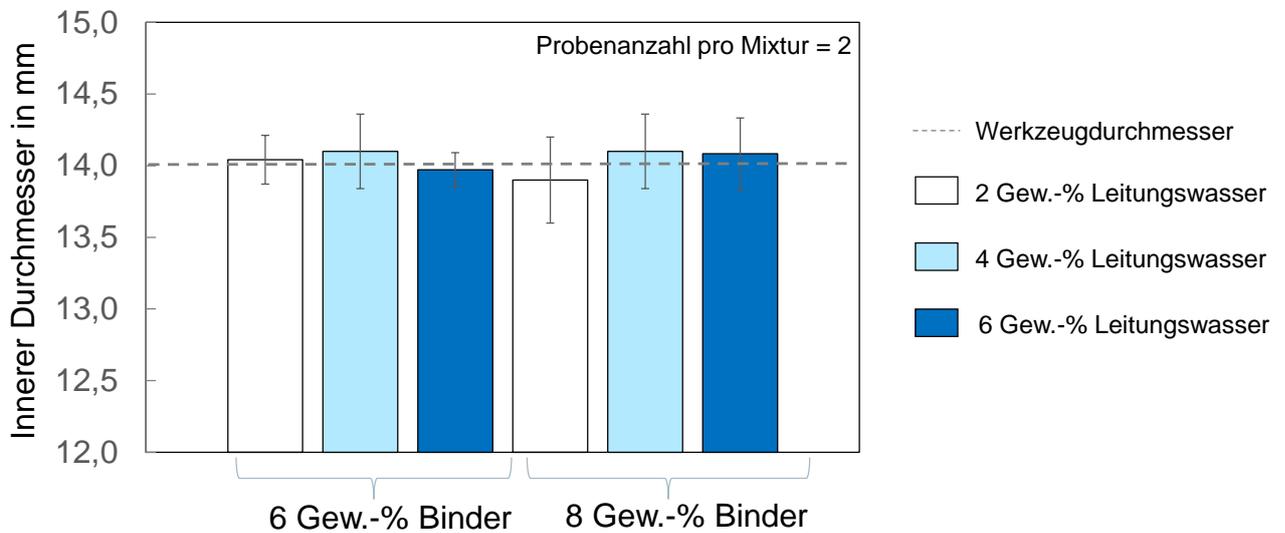


Abbildung 9-14: Gemessene Innendurchmesser von Hohlkernen mit pulverförmigen Wasserglasbinder.

Entkernbarkeit

Abbildung 9-15 zeigt das Ergebnis des Entkernverhaltens von Hohlkernen mit 6 Gew.-% Leitungswasser und 2 Gew.-% flüssigem Wasserglasbinder im Vergleich zu Referenzkernen

mit 2 Gew.-% flüssigen Wasserglasbinder. Wie in der Versuchsbeschreibung erwähnt, werden zwanzig Impulse als eine Serie definiert. Die Hohlkerne benötigen eine Impulsserie bis zur vollständigen Entkernung. Im Vergleich dazu benötigen die Vollkerne mindestens 4 bis 6 Impulsserien bis zur vollständigen Entkernung. Aufgrund ihrer Geometrie haben Hohlkerne ein deutlich besseres Entkernverhalten als die Vollkerne bzw. Referenzkerne.

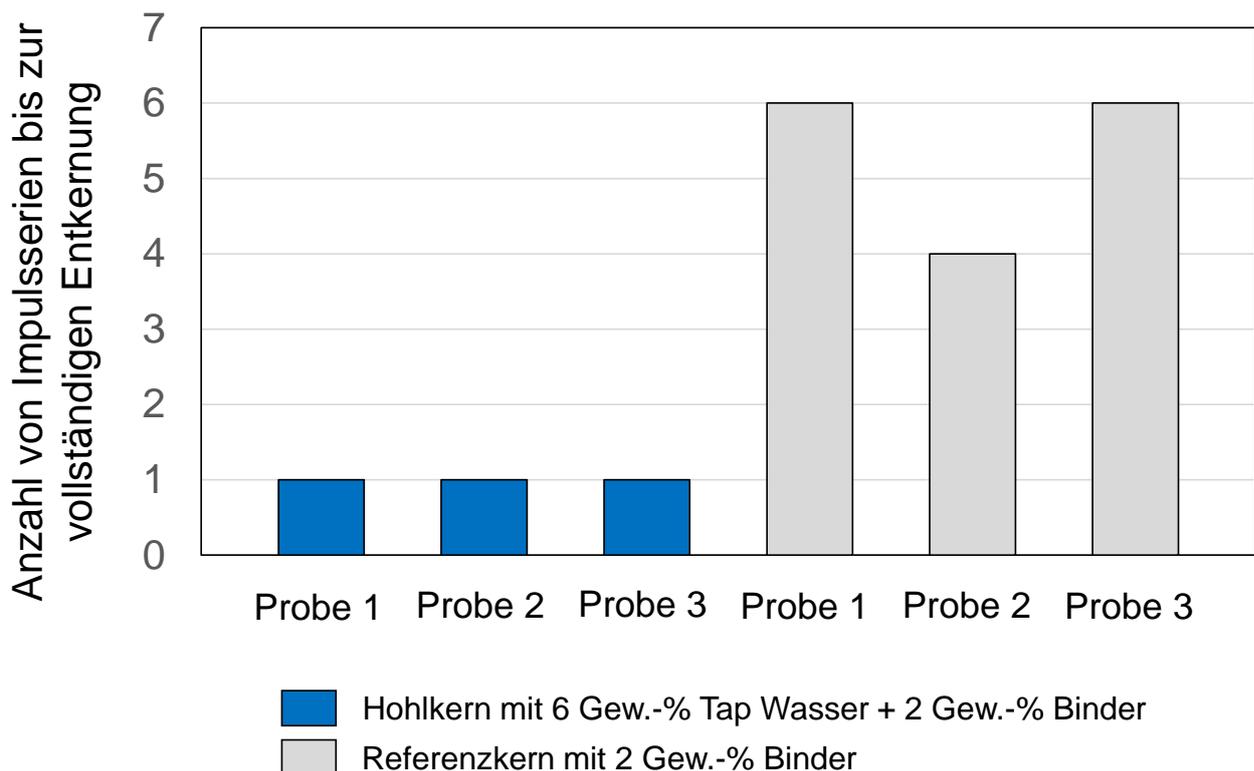


Abbildung 9-15: Anzahl Impulsserien bis zur vollständigen Entkernung.

9.2.8 Diskussion

Hinweise zur Herstellung von Hohlkernen unter Einsatz verlorener Eiskerne

Die Aufbereitung des VE spielt eine wichtige Rolle. Dazu gehört die sichere Entformung des VE aus dem Werkzeug. Um den VE sicher vom Werkzeug zu trennen, ist ein frostbeständiger Trennfilm, wie z.B. ein Trennmittel oder eine Werkzeugbeschichtung, erforderlich. Das Gleiche gilt für die Entnahme des PK aus dem Hot-Box-Werkzeug nach der Aushärtung. Nach dem Aushärtungsschritt muss der VE vollständig ausgetrocknet und der PK vollständig ausgehärtet sein, um den PK aus dem Werkzeug zu entnehmen. Es ist denkbar, dass der PK nach dem

Entfernen des ausgetrockneten VE über Auswerferstifte aus dem Hot-Box-Werkzeug zu heben. In dieser Studie wurde der PK durch leichte Schläge mit einem Gummihammer aus dem Werkzeug entnommen.

Darüber hinaus sind der Wassergehalt im VE und die korrekte Zentrierung im Kernschießwerkzeug für Hohlkernproduktion von entscheidender Bedeutung. Das gefrorene Wasser verwandelt sich in Eis und wirkt als Bindemittel zwischen den Sandpartikeln, wodurch der VE für die Handhabung gestärkt wird. Ein ausreichend hoher Wassergehalt ist für die Verarbeitung unerlässlich, um genügend Zeit für die Platzierung im Kernschießwerkzeug zu haben. Der Wassergehalt im VE sollte jedoch nicht zu hoch sein. Andernfalls wird die Aushärtung des Wasserglasbinders beeinträchtigt. Dies ist in Abbildung 9-16 a) dargestellt. Hier wurde versucht, einen Hohlkern mit 10 Gew.-% Leitungswassergehalt im VE herzustellen. Das vorhandene Eis verflüssigt sich während des Ofenprozesses. Es dringt durch die Schwerkraft von der Schussseite zur Entlüftungsseite nach unten und behindert die Aushärtung der von Wasserglas umgebenen Sandpartikel.

Dieses Fehlerbild ist auch bei der falschen Ausrichtung des VE in der Form erzeugbar. Die korrekte Zentrierung des VE im Werkzeug ist entscheidend für die Herstellung eines Hohlkörpers. Ein falsch ausgerichteter VE kann nicht homogen ummantelt werden, so dass nur unzureichend die Außenkontur durch das Sand-Binder-Gemisch abgebildet werden kann, Abbildung 9-16 b).



Abbildung 9-16: Exemplarische Herstellungsfehler bei der Hohlkernfertigung.



Die Methodik zeigt, dass die Geometrie des Einlegers für die Herstellung von Hohlkernen geeignet ist. Andere Einlegergeometrien sind denkbar, wenn sie eine gute Durchlässigkeit für das PK-Gemisch aufweisen. Ohne Einsatz ist die Herstellung von Hohlkernen nicht möglich, da die Kontur des VE durch das einströmende PK-Gemisch während des Einschusses zerstört wird. Dabei ist zu beachten, dass der Einleger die Zentrierung unterstützt und den VE vor Abrieb durch das einströmende PK-Gemisch schützt.

Der ausgetrocknete VE kann unendlich oft wiederverwendet werden. Dieses Verfahren trägt zu einer ressourcenschonenden Herstellung bei, da weniger Sand und Wasserglasbinder benötigt werden.

Biegefestigkeit, Innendurchmesser von Hohlkernbiegeriegeln und Entkernverhalten

Der Biegefestigkeitsvergleich mit flüssigem Bindemittel zeigt, dass im Vergleich zur Referenzprobe mit etwa einem Drittel weniger Material im Hohlkernbiegeriegel ausreichend hohe Festigkeiten erreicht werden können. Die Mischung aus 6 Gew.-% VE und 2 Gew.-% flüssigem Wasserglasbinder ist als ideale Mischung anzusehen, da sie einen guten Kompromiss zwischen Handhabung des VE und der Biegefestigkeit ergibt. Die Festigkeit bleibt bei einem Flüssigwasserglasgehalt von mehr als 2 Gew.-% gleich.

Der Festigkeitsvergleich mit pulverförmigem Bindemittel zeigt keine Unterschiede zwischen dem Hohlkern und der Referenz, unabhängig von der Zusammensetzung der Mischung. Es ist jedoch zu beachten, dass die Hohlkernbiegeriegel trotz des geringeren Materialanteils im Vergleich zur Referenz das gleiche Festigkeitsniveau aufzeigen. Materialeinsparungen sind für eine ressourcenschonende Produktion von Vorteil. Nach der Mischungsvorgabe des Herstellers für den pulverförmigen Binder wurde die Wasserzugabe mit ca. 50 % auf Basis der Pulverbindermenge spezifiziert. Im Vergleich zum flüssigen Binder haben sie eine deutlich geringere Festigkeit.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Biegeversuche, dass der Wassergehalt im VE keinen Einfluss auf die Festigkeit hat. Die niedrige Festigkeit der Hohlkerne im Vergleich zu den Referenzkernen weist trotz des gleichen Bindemittelgehalts eine geringere Festigkeit auf. Dies ist auf das fehlende Stützmaterial im Hohlkern zurückzuführen.

Eine Vermutung für den abnehmenden Hohlkerndurchmesser bei 2 und 3 Gew.-% flüssigem Wasserglas ist, dass einige benachbarte Sandpartikel des VE in das PK-Material wandern und

das Wasser den Binder verdünnt. Zur besseren Veranschaulichung ist diese Theorie in Abbildung 9-17 dargestellt. T₁ zeigt den Ausgangszustand des Probekörpers nach dem Schießvorgang. Hier umgibt das PK-Material den VE. T₂ zeigt den Probekörper im Ofen. Im Ofen laufen zwei Prozesse ab. Das im VE vorhandene Wasser beginnt mit zunehmender Trocknungszeit von einem festen in einen flüssigen Zustand überzugehen. Das flüssige Wasser verdünnt das umgebende Wasserglas in der Randzone des VE. Das verdünnte Wasserglas wandert an der Grenzfläche zwischen dem PK-Material und dem VE in den VE hinein. Mit fortschreitender Aushärtungszeit härtet das Wasserglasbindemittel aus und bindet die Sandpartikel in der Nähe der VE-Grenzfläche, wodurch sich der Durchmesser des Hohlkerns, T₃, verringert. Bei einem Bindemittelgehalt von 1 Gew.-% ist die im PK-Material vorhandene Menge an Bindemittel zu gering, um andere Sandpartikel aus dem VE zu binden. Anders als das flüssige Bindemittel bindet das pulverförmige Bindemittel keine anderen Sandpartikel aus dem VE. Eine Theorie ist, dass das trockene Pulverbinder nicht mit dem Wasser aus dem VE in Lösung geht und daher im Vergleich zu Proben mit flüssigem Binder keine Sandpartikel mehr bindet.

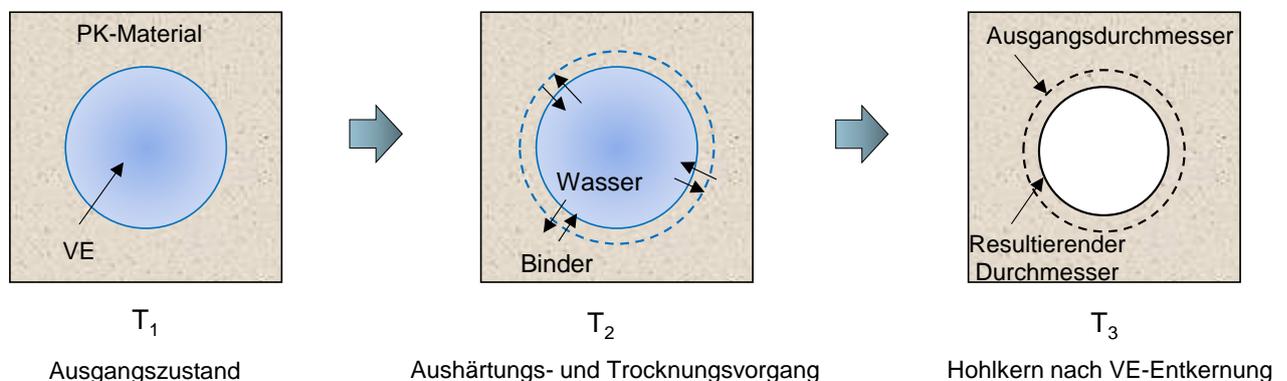


Abbildung 9-17: Modell der Binderwechselwirkung aus Wasser im Eiskern und Wasserglasbinder im Primärkern.

Neue Möglichkeiten und Herausforderungen für die industrielle Anwendung

Abbildung 9-18 zeigt detaillierte Bilder von der Herstellung eines Doppelrohrkerns. Die Herstellung erfolgt nach der gleichen Methode wie zur Herstellung der Hohlkernbiegeriegel. Die Methodik zeigt, dass vergleichbare Kerngeometrien wie beim 3D-Sanddruck hergestellt werden können. Allerdings handelt es sich hierbei nicht um eine reale Kerngeometrie für ein



Gussteil. Es kann hier aber gezeigt werden, dass im Vergleich zu einem zylinderförmigen Probekörper komplexere Kerngeometrien hergestellt werden können. In zukünftigen Arbeiten muss untersucht werden, wie mit der vorgestellten Methodik noch komplexere Kerne hergestellt werden können.

Grundsätzlich liegt der größte Vorteil von Hohlkernen in ihrem besseren Entkernverhalten im Vergleich zu Vollkernen. Daher ist die Anwendung im Eisenguss von besonderem Interesse, da in diesem Bereich die Entkernungsfähigkeit eine der wesentlichen Eigenschaften des Formstoffs ist. Ein Auspuffkrümmer kann zum Beispiel als mögliche Anwendung interessant sein.

Aber auch im Leichtmetallguss, etwa im Aluminiumbereich, bietet die erhöhte Entkernbarkeit von Hohlkernen Vorteile. Eine mögliche Anwendung wäre ein Hinterachsträger.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist im Handformguss zu sehen. Hier können einfache schalenartige Strukturen als Außenform von Gussteilen hergestellt werden, um Materialressourcen zu sparen.

All diese Möglichkeiten bringen jedoch auch Herausforderungen bei der Herstellung mit sich, insbesondere im Bereich der Kernmarke des VE. Bei sehr komplexen Kernen muss sichergestellt werden, dass der VE ausreichend lange stabil und sicher in der Kernmarke bleibt, bis der PK eingeschossen wird. Eine Möglichkeit besteht darin, den Wassergehalt im VE zu erhöhen, um die Stabilität im Hot-Box-Werkzeug über die Zeit zu verlängern. Eine andere Möglichkeit wäre eine Wasserkühlung im Bereich der Kernmarke oder ein keramischer Einsatz oder eine Beschichtung zum Schutz des VE vor übermäßiger Wärmezufuhr zu schützen.

Weiter erfordert das präzise Einsetzen des VE und das Schließen des Hot-Box-Werkzeugs handwerkliches Geschick des Gießereipersonals.

Eine weitere Herausforderung stellt die Herstellung des VE dar. In dieser Arbeit wurde ein VE mit einer Zykluszeit von 24 Stunden hergestellt, was weit von einer industriellen Anwendung entfernt ist. Mit einer Flüssigstickstoffversorgung ist es vorstellbar eine kürzere Taktzeit bei der Herstellung im Vergleich zu der hier präsentierten Variante mit einem Eisfach. Eine weitere Alternative wäre die Verwendung von Trockeneis zum Herunterkühlen des Werkzeugs, um einen VE zu erzeugen. Thermolemente im Werkzeug im Formmaterial könnten ermitteln, wie lange die Gefrierzeit ist, bis der VE eine ausreichende Festigkeit besitzt.

Nach dem Aushärtungsprozess im Ofen wird der getrocknete VE aus dem Hot-Box-Werkzeug ausgekippt und kann in einem Serienprozess ein Problem darstellen, da der austretende Sand das Kernschießwerkzeug für den nächsten Schuss verunreinigt. In diesem Fall müssen Anpassungen an der Konstruktion des Kernschießwerkzeugs vorgenommen werden oder es müssen über Roboter Stopfen bereitgestellt werden, um das Herausrieseln des Sandes zu verhindern.



Abbildung 9-18: Doppelrohrkern als Anwendungsdemonstrator.

9.2.9 Schlussfolgerungen zur Hohlkerntechnologie mittels Eiskern

Die am Fraunhofer IGCV entwickelte Methode zeigt, dass der VE-Kern zur Herstellung von hohlen wasserglasgebundenen Sandkernen in einem konventionellen Kernschießverfahren verwendet werden kann. Es können Kernkomplexitäten hergestellt werden, die bisher nur im 3D-Sanddruck möglich waren. Einleger sind notwendig, um den VE während des Kernschießens vor Abrieb zu schützen und ihn im Werkzeug zu zentrieren. Geometrisch sollten die Einsätze eine günstige Durchlässigkeit für das wasserglasgebundene Gemisch beim Kernschießen aufweisen. Die Biegefestigkeit des Hohlkerns erreicht eine ausreichende Festigkeit, und das Entkernungsverhalten ist deutlich besser als bei den Referenzproben. Der geringere Materialverbrauch für Sand und Bindemittel durch die Wiederverwendbarkeit von VE beweist die Nachhaltigkeit des Verfahrens. Sie kann zu einer umweltfreundlicheren Produktion in der Metallgussindustrie beitragen. Die vorliegende Methodik könnte auch Formen in Schalenstrukturen mit geringer Komplexität im Handformbereich herstellen. Herausforderungen ergeben sich bei der Handhabung des VE und der Einstellung kürzerer Trocknungszeiten. Die Prozesskette und der Energieverbrauch in der Gießerei müssen untersucht werden. Intelligente logistische Lösungen unter

ökologischen und praktischen Gesichtspunkten sind erforderlich. Abbildung 9-19 gibt einen Ausblick für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Beispiel einer möglichen Prozesskette.

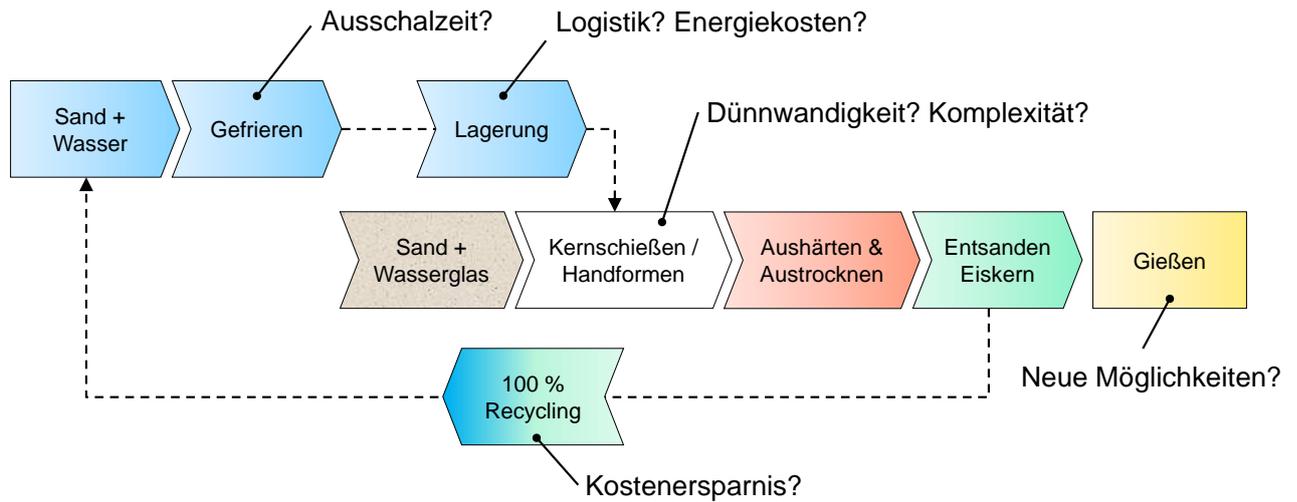


Abbildung 9-19: Ausblick für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten am Beispiel einer möglichen Prozesskette.



10 Literaturverzeichnis IGVC

- 1 Fortini, A., Merlin, M. & Raminella, G. A Comparative Analysis on Organic and Inorganic Core Binders for a Gravity Diecasting Al Alloy Component. *Inter Metalcast* **16**, 674–688 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40962-021-00628-1>
- 2 H. Polzin, Inorganic Binders: For Mould and Core Production in the Foundry. BoD–Books on Demand (2020)
- 3 D. Günther, F. Möggle, Additive manufacturing of casting tools using powder-binder-jetting technology. *New Trends 3D Print.* 6, 66 (2016). <https://doi.org/10.5772/62532>
- 4 F. Ettemeyer, F. Steinlehner, P. Lechner, W. Volk, D. Günther, Detection of Core Fracture in Inorganically Bound Cast-in Sand Cores by Acoustic Microphony (Congress of the German Academic Association for Production Technology, 2018) https://doi.org/10.1007/978-3-030-03451-1_4
- 5 B.J. Stauder, H. Harmuth, P. Schumacher, De-agglomeration rate of silicate bonded sand cores during core removal. *J. Mater. Process. Technol.* 252, 652–658 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.027>
- 6 Online Document. European Council, Climate Change. What the EU is Doing. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/>. Zugriff am 6 Januar 2023
- 7 M. Holtzer, A. Kmita, Mold and core sand in metal casting. *Chem. Ecol.* (2020). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-53210-9>
- 8 D. Günther, F. Ettemeyer, Entkernen anorganisch gebundener Kerne beim Aluminiumgießen durch konsequentes Kerndrucken. *Giesserei.* Ausgabe 6, 62–65 (2018)

11 Veröffentlichungen

- Christopher Locke (30.03.2023). Erzeugung von anorganisch gebundenen Hohlkernen mit Hilfe von verlorenen Eiskernen. Vortrag. 4. Formstoff-Forum 2023, Clausthal.
- Locke, C., Polzin, H., Bissels, J. et al. Production of Inorganic Hollow Cores Using Sacrificial Ice Cores. Inter Metalcast (2023). <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01101-x>

12 Versuchsdurchführung PEAK

12.1 Kernschießmaschine und Werkzeug

Zur Herstellung der Probekerne kam eine Kernschießmaschine der Firma Laempe mit einem Schießkopfvolumen von 1-3 L zum Einsatz. Die Verfestigung des Formstoffs erfolgt hierbei ausschließlich durch eine Begasung mit ca. 160°C warmer Luft. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden zusätzlich für einen Teil der Proben Versuche mit einem temperierten Werkzeug vorgenommen. Das eingesetzte Bindemittel ist ein einkomponentiges System, welches ohne zusätzliche Additive in Bereichen von weniger als 2,5%, in vielen Fällen unter 2% dosiert werden kann.



Abbildung 12-1: Kernschießmaschine

Als Werkzeug kam ein temperierbarer Aluminiumkernkasten für Biegeriegel mit 3 Kavitäten zum Einsatz. Das erforderliche Thermoelement zur Temperatursteuerung sowie -überwachung sitzt dabei im unteren Kernkastenbereich in Konturnähe. Der Kernkasten für Biegeriegel wurde ausgewählt, da somit einfach die mechanische Belastbarkeit mittels Prüfgerät untersucht und mit den vorhandenen Verfahren verglichen werden kann.

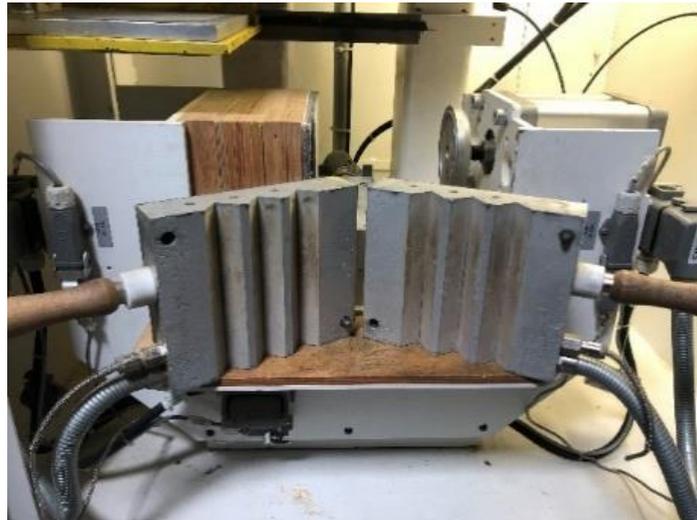


Abbildung 12-2: Werkzeug

12.2 Parameter

Wie bei allen Verfahrensvarianten können verschiedene Prozessparameter eingestellt und optimiert werden. Hauptsächlich werden folgende Parameter einbezogen:

- Binderanteil [%]
- Schießzeit [s]
- Schießdruck [bar]
- Begasungszeit [s]
- Begasungsdruck [bar]
- Begasungstemperatur [°C]
- Evakuierung der Kavität [s]
- Temperatur Kernkasten [°C]

Aus den einzelnen Prozessparametern resultiert letztlich die Zykluszeit zur Kernherstellung. Diese sollte so nah wie möglich an der Zykluszeit der klassischen Kernfertigungsverfahren liegen.

12.3 Versuchsdurchführung

12.3.1 Variante 1 Vollkern als Referenz

Die Fertigung von Kernen aus Vollmaterial dient lediglich der Referenzmessung. Das Ziel der Hohlkernfertigung ist, neben der Reduktion der Einsatzmenge an Formstoff und Bindemittel und der daraus resultierenden besseren Ökobilanz, ein schnelleres Aushärteverhalten, um die Taktzeiten der Fertigung zu minimieren und damit letztlich näher an die gängigen Verfahren heranzukommen. Ein weiterer positiver „Nebeneffekt“ ist ein verbessertes Auspackverhalten, da die Zerfallseigenschaften von anorganisch gebundenen Kernen schlechter ist, als bei den üblichen Fertigungsverfahren. Die mechanische Festigkeit in Bezug auf das Bruchverhalten darf hingegen nicht eklatant schlechter sein. Die Formteile sind zuletzt den gleichen mechanischen Einflüssen durch Transport und Handling im Gießereibetrieb ausgesetzt.

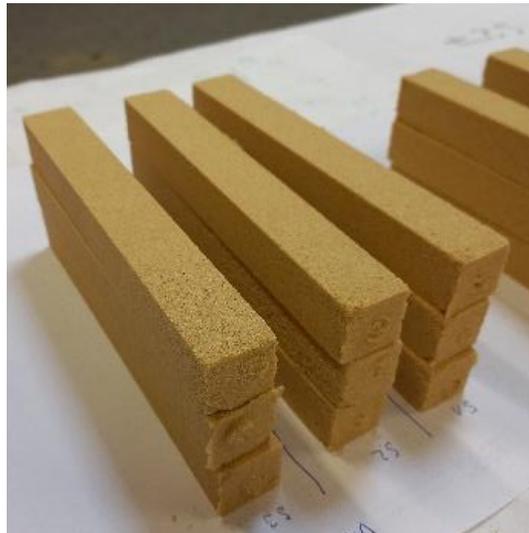


Abbildung 12-3: Vollkern Biegeriegel

12.3.2 Variante 2 Folienkern

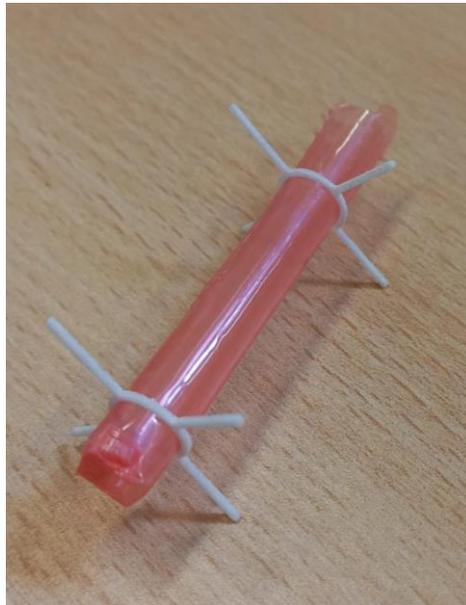


Abbildung 12-4: Folienkern

Zur Erzeugung des Hohlraumes wurden im ersten Schritt Kerne mittels Vakuumverpackungsfolie hergestellt.

Diese wurde um einen Stab mit \varnothing 8mm gewickelt, einseitig verschweißt und mit losem Sand befüllt. Abschließend erfolgte die Evakuierung des Folienkerns sowie das verschweißen des offenen Endes. Zur Fixierung sowie Positionierung im Werkzeug wurden Haltekreuze aus Polyamid mittels 3D Druck (SLS) hergestellt. Leider gab es aus dem Bereich der Verpackungsmittel- und ähnlichen Industrien keinen Folienschlauch mit einem Durchmesser von 8 oder 10 mm. Eine Sonderanfertigung hätte das Projektbudget deutlich überschritten. Da dieses Vorgehen sehr aufwendig schien, suchte man nach alternativen. Eine gute Option schien dafür die Verwendung von Schrumpfschläuchen aus der Elektrotechnik zu bieten, welche folgend beschrieben wird.

12.3.3 Variante 3 Schrumpfschlauchkern

Für ein verbessertes Handling beim Befüllen sowie Evakuieren der Schrumpfschläuche wurde auf dem hauseigenen FDM-Drucker eine Hilfsvorrichtung angefertigt.

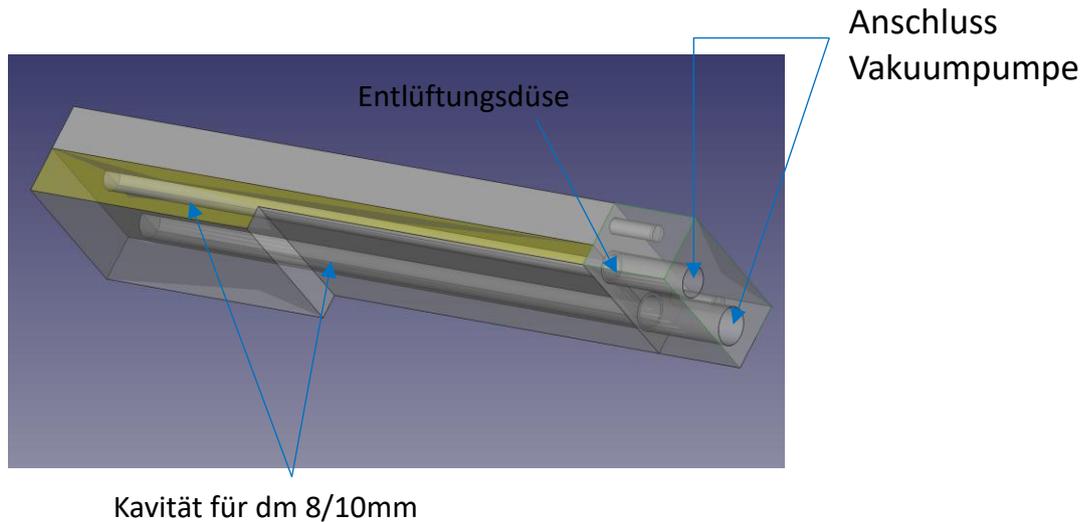


Abbildung 12-5: Konstruktion Hilfsvorrichtung



Abbildung 12-6: 3D Druck Vorrichtung

Die Herstellungsschritte für die Schlumpfschlauchkerne sind äquivalent zu den Folienkernen:

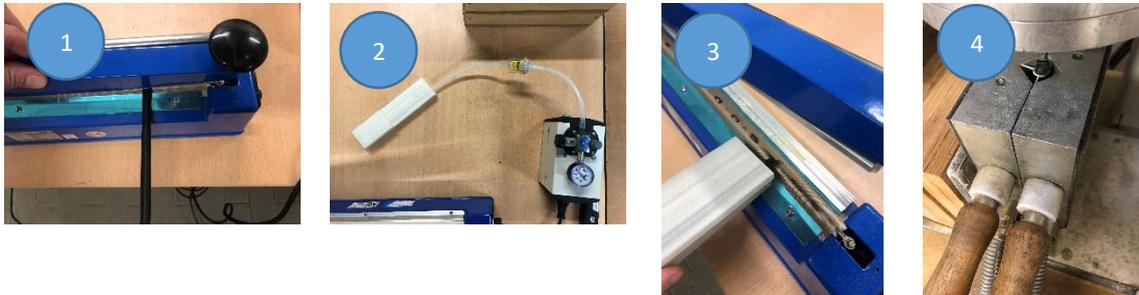


Abbildung 12-7: Herstellungsschritte Schumpfschlauchkern

1. Einseitiges verschweißen des Schumpfschlauches und befüllen mit losem Sand in Vorrichtung
2. Evakuieren des befüllten Schlauchs zur Verfestigung des ungebundenen Formstoffes
3. Verschweißen der zweiten Seite
4. Einlegen ins Werkzeug und Fixierung mittels Kreuzen
5. Schießen der Sandkerne, und Entnahme aus dem Werkzeug
6. Schlauch aufschneiden, losen Formstoff entfernen
7. Brechen der Biegeriegel im Prüfgerät



Abbildung 12-8: geprüfte Biegeriegel

12.3.4 Ergebnisauswertung

Wie eingangs beschrieben wurde zuerst eine Referenzmenge an Vollkernen geschossen. Dies dient einerseits der Erfassung einer vergleichbaren Datengrundlage, aber auch der Ermittlung der Fertigungsparameter.

12.3.4.1 Versuchsreihe 1

Die erste Versuchsreihe fertigte man mit folgenden Parametern:

- Formstoff QQS26
- Schießzeit 1s
- Schießdruck 1bar
- Begasungsdauer: 1 bar 60s bei gleichzeitigem Vakuum über Maschinentisch
- Begasungstemperatur: 160°C (Eintritt im Begasungsschlitten ca. 120-130°C)
- Formstoff mit 1,5% Binder
- Werkzeug unbeheizt

Die Ermittlung der Festigkeit erfolgte direkt nach dem entformen aus der Kavität.

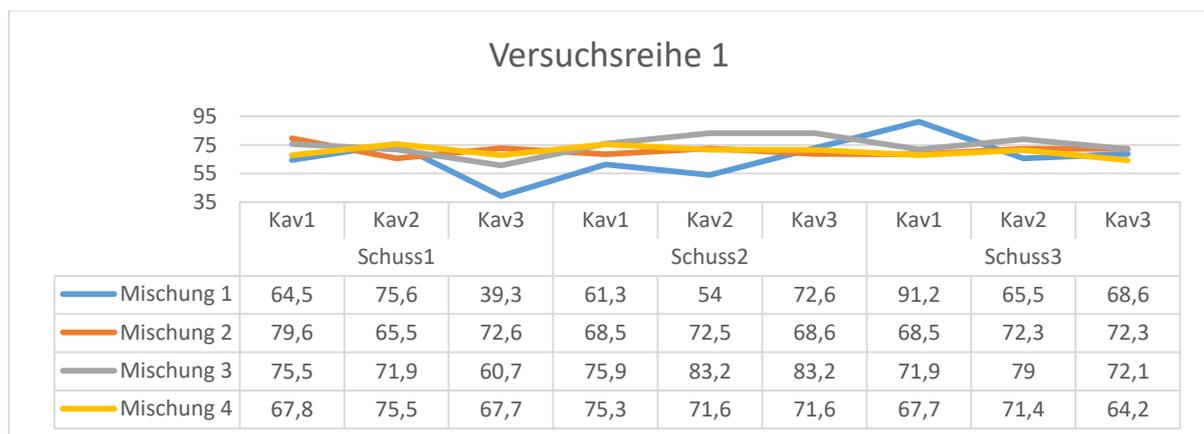


Abbildung 12-9: Ergebnisse Versuchsreihe 1

12.3.4.2 Versuchsreihe 2 mit Folienkernen

In der zweiten Versuchsreihe wurde erstmals ein Folienkern zur Erzeugung des Hohlraums eingesetzt. Die Prozessparameter blieben vorerst unverändert. Das Werkzeug hatte Raumtemperatur um die Ergebnisse nicht zu beeinflussen.

- Schießzeit 1s
- Schießdruck 1bar
- Begasungsdauer: 1 bar 60s bei gleichzeitigem Vakuum über Maschinentisch
- Begasungstemperatur: 160°C (Eintritt im Begasungsschlitten ca. 120-130°C)
- Formstoff mit 1,5% Binder
- Werkzeug unbeheizt

Die Ermittlung der Festigkeit erfolgte direkt nach dem entformen aus der Kavität.

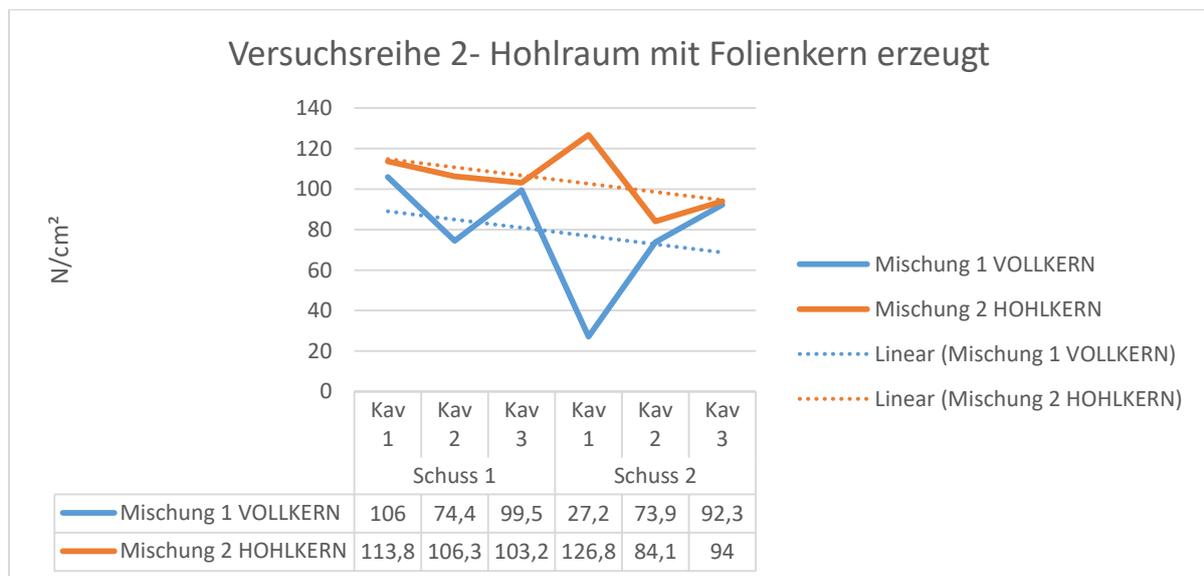


Abbildung 12-10: Ergebnisse Versuchsreihe 2

Die leicht erhöhte Festigkeit des Hohlkernes resultiert einerseits aus dem geringeren Sandvolumen und der damit verbundenen besseren Durchströmung der Kavität mit Heißluft.

12.3.4.3 Versuchsreihe 3

Da Aluminium ein relativ guter Wärmeleiter ist beträgt die Werkzeugtemperatur durch die kontinuierliche Fertigung bereits ca. 50 °C. Daher erfolgte die Reduzierung der Begasungszeit auf für die dritte Versuchsreihe auf 50 s. Bei der Hohlkernvariante mit Folienkern sollte dies, auch bei „kaltem“ (Raumtemperatur) Werkzeug möglich sein.

- Formstoff QQS26
- Schießzeit 1s
- Schießdruck 1bar
- Begasungsdauer: 1 bar 50s bei gleichzeitigem Vakuum über Maschinentisch
- Begasungstemperatur: 160°C (Eintritt im Begasungsschlitten ca. 120-130°C)
- Formstoff mit 1,5% Binder
- Werkzeug unbeheizt

Die Ermittlung der Festigkeit erfolgte direkt nach dem entformen aus der Kavität.

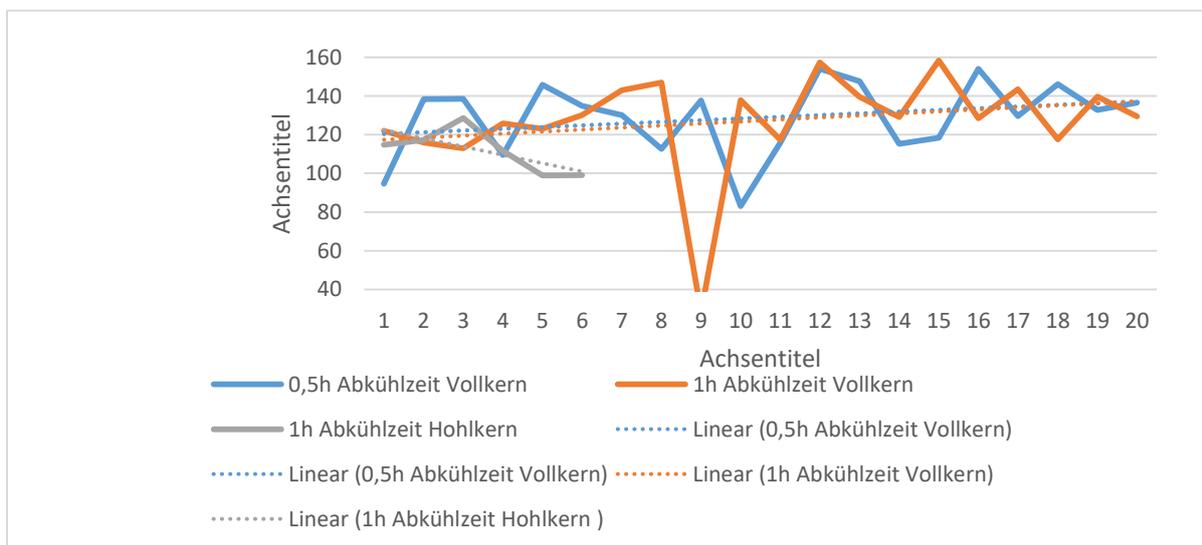


Abbildung 12-11: Ergebnisse Versuchsreihe 3

Die Prozessbedingte Werkzeugtemperatur führte dazu, dass sich die Festigkeitswerte nahezu identisch entwickeln.

12.3.4.4 Versuchsreihe 4

Im Rahmen der vierten Versuchsreihe wurde der Grenzbereich für die Begasungszeit sowie die erforderliche Bindermenge untersucht. Die Begasungsdauer wurde dafür auf 40s reduziert und der Binderanteil auf 1,5% reduziert.

- Formstoff QQS26
- Schießzeit 1s
- Schießdruck 1bar
- Begasungsdauer: 1 bar 40- 50s bei gleichzeitigem Vakuum über Maschinentisch
- Begasungstemperatur: 160°C (Eintritt im Begasungsschlitten ca. 120-130°C)
- Formstoff mit 1,5%-2% Binder
- Werkzeug unbeheizt

Die Ermittlung der Festigkeit erfolgte direkt nach dem entformen aus der Kavität, sowie nach einem Zeitraum von 24h.

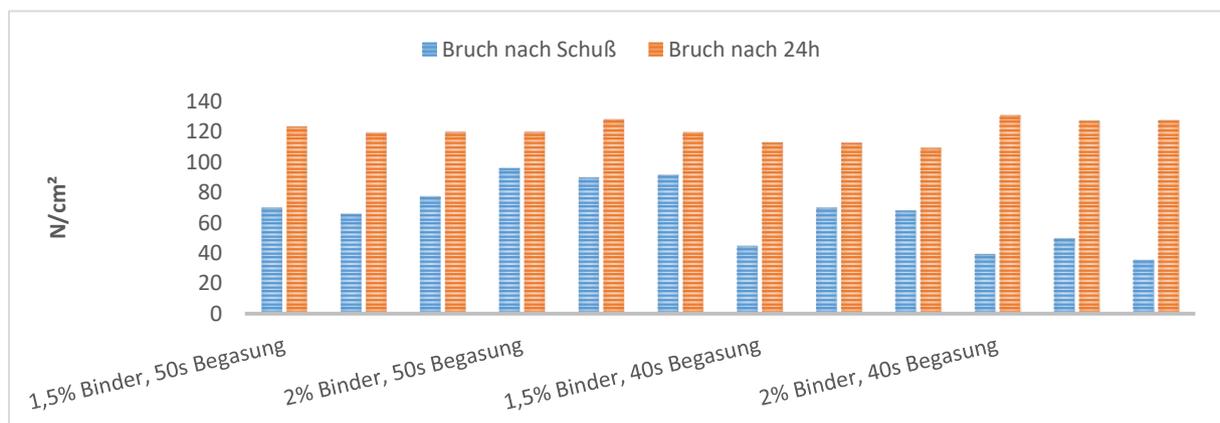


Abbildung 12-12: Ergebnisse Versuchsreihe 4

Es ist deutlich geworden, dass der Binderanteil sowie die Begasungszeit primär Einfluß auf die Festigkeit direkt nach der Entformung hat. Die Endfestigkeit mit einem Binderanteil von 2% liegt natürlich etwas höher. In der Praxis muss letztlich ermittelt werden, ob die geringfügig höhere Festigkeit für Handling und Stabilität beim Abguss überhaupt erforderlich ist.

12.3.4.5 Versuchsreihe 5

In der letzten Versuchsreihe wurde die 2. Variante zur Hohlkernherstellung mittels Schaumpfschlauch beprobt. Auch hier wurden Binderanteil sowie Begasungszeit variiert.

- Formstoff QQS26/ S60
- Schießzeit 1s
- Schießdruck 1bar
- Begasungsdauer: 1 bar 50- 60s bei gleichzeitigem Vakuum über Maschinentisch
- Begasungstemperatur: 160°C (Eintritt im Begasungsschlitten ca. 120-130°C)
- Formstoff mit 2%- 3% Binder
- Werkzeug unbeheizt

Die Ermittlung der Festigkeit erfolgte direkt nach dem entformen aus der Kavität, nach einer Stunde und nach einem Zeitraum von 24h.

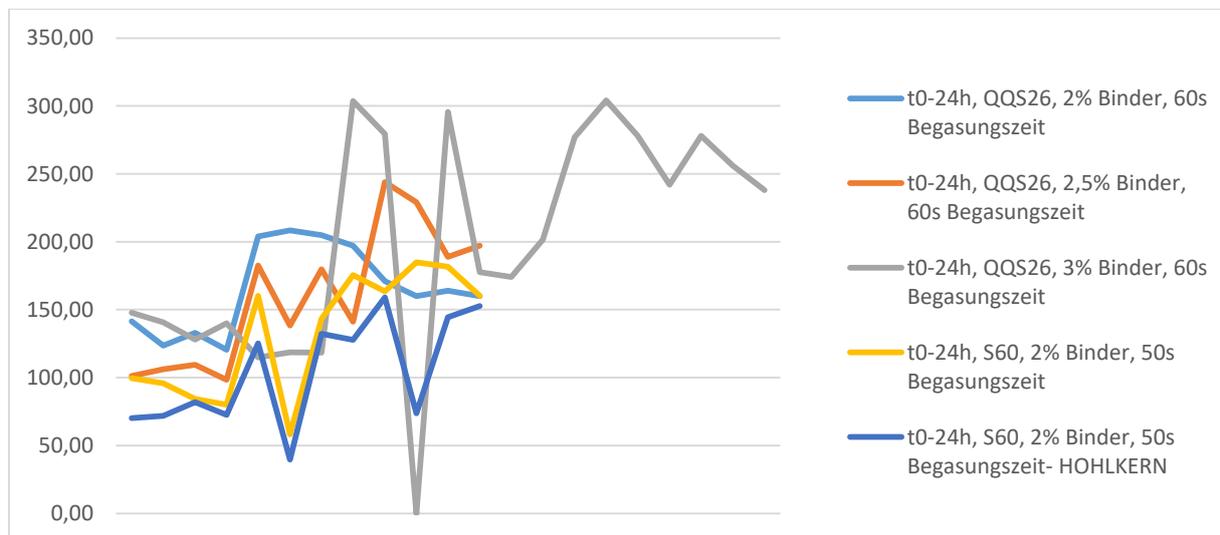


Abbildung 12-13: Ergebnisse Versuchsreihe 5

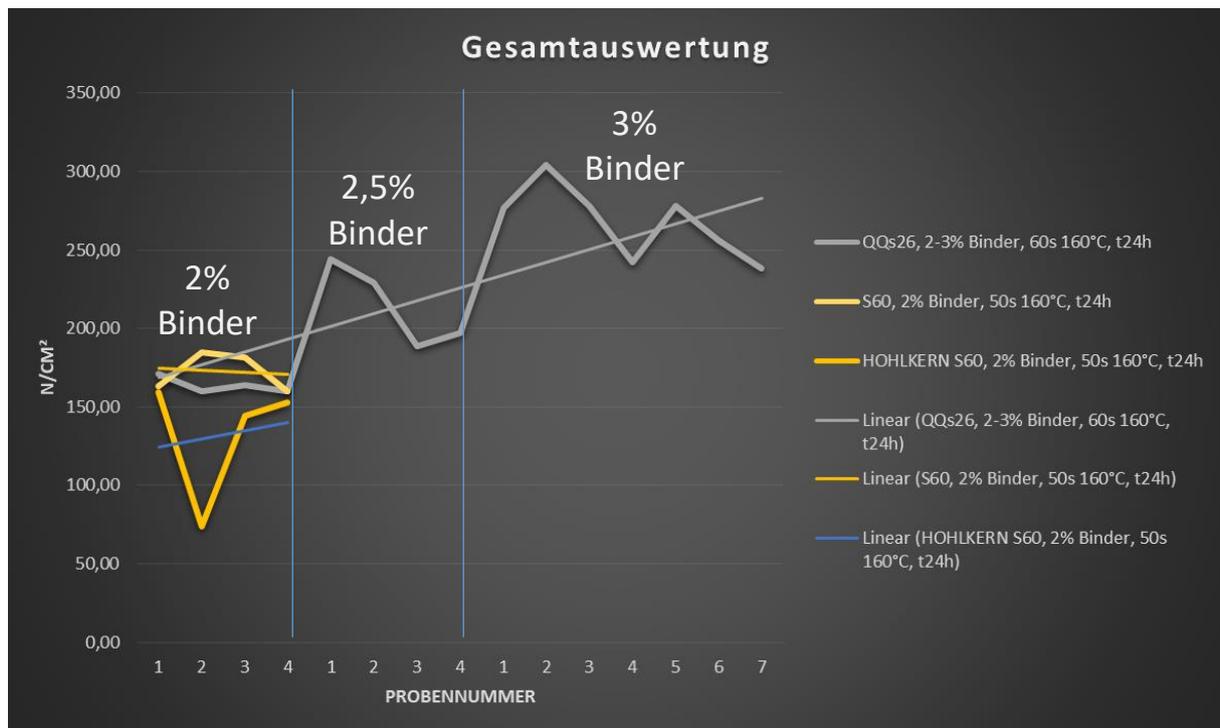


Abbildung 12-14: Gesamtauswertung

Die Ergebnisse der Untersuchung waren wie erwartet. Mit einem Prozentanteil mehr Binder fallen die Festigkeitswerte deutlich höher aus und sind absolut vergleichbar mit den gängigen bekannten Fertigungsverfahren. Der Einfluss der Begasungszeit spiegelt sich vor allem beim entformen wieder. Wie in der vorrangegangenen Untersuchung ist anzumerken, dass die Praxis zeigen muss, ob diese hohe Festigkeit für das Handling in den Gießereien und Stabilität beim Abguss überhaupt erforderlich ist. Nachteil der hohen Festigkeit ist schlussendlich das nachteilige Verhalten beim entformen im Zuge der Gussnachbehandlung.

12.4 Alternative Werkstoffe für Werkzeuge

Die Kernfertigung mit anorganischen Bindemitteln, welche mittels hoher Temperaturen aushärten, kommt aktuell nur bei der Fertigung von Großserien zum Einsatz. Hauptgrund dafür sind die exorbitanten Werkzeugkosten, da auf Grund der hohen Stückzahlen sowieso mit temperierten Stahlwerkzeugen gearbeitet wird. Bei kleinen und mittleren Serien sind diese Kosten gegenüber dem Kunden nicht zu rechtfertigen, daher hat sich das Verfahren in diesem Bereich bisher noch nicht durchsetzen können. Mit dem Bindersystem Cast Clean VC kann und soll an dieser Stelle eine Wende erreicht werden. Immer wieder kommt die Frage aus den Gießereien, ob mit vorhandenen Kernschießwerkzeugen aus Kunststoffen gearbeitet werden kann. In diesem Zusammenhang wurden uns von der Firma ebalta Kunststoff GmbH zwei Kunststoffmaterialien zur Verfügung gestellt, welche eine etwas höhere Wärmeformbeständigkeit, sowie eine geringer Wärmeausdehnung bei Begasungstemperaturen zwischen 120- 160°C haben:

- Epoxidharz Platte „ebaboard EP 138“
- Polyurethan Block „ebablock® P 185“

Die Kernkästen wurden identisch zu dem Kernkasten für Biegeriegel aus den vorhergehenden Versuchen aufgebaut. Einziger Unterschied ist eine Aluminiumplatte auf der Oberseite um ein anbacken der Begasungsplatte zu vermeiden. Im unteren Kernkastenbereich wurden zudem, einmal konturnah und einmal in einiger Entfernung Thermoelemente angebracht, um die Temperaturentwicklung zu dokumentieren.

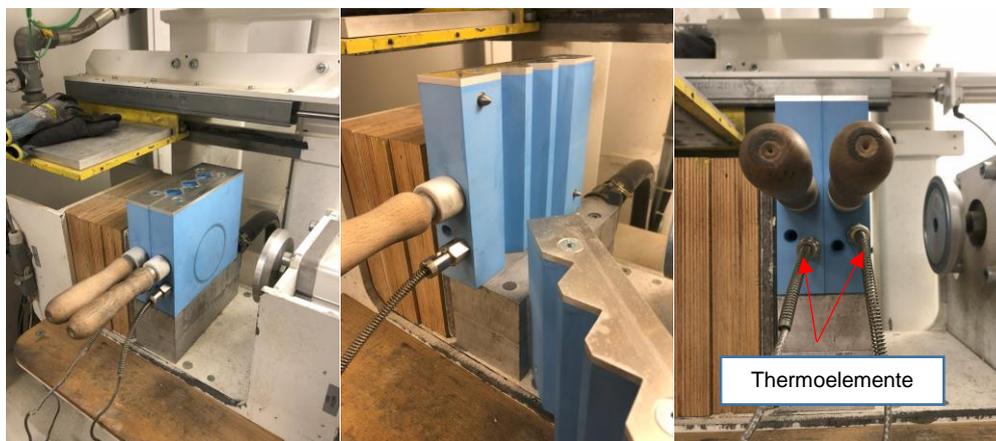


Abbildung 12-15: Kunststoffwerkzeug mit Thermoelementen

Zuerst erfolgte die Beprobung der Epoxidharz Platte.

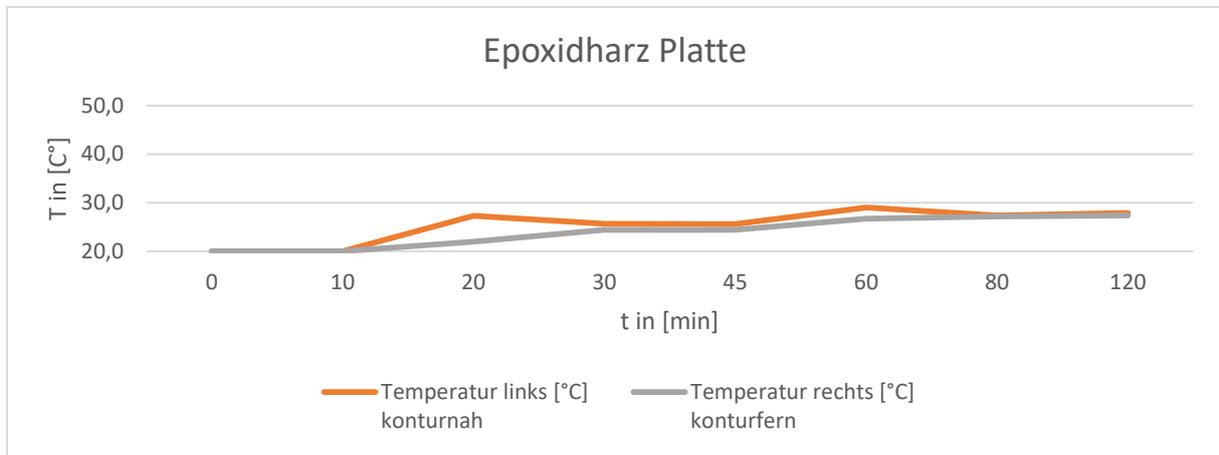


Abbildung 12-16: Ergebnisse Epoxidharzplatte

Während einer zweistündigen kontinuierlichen Fertigung von Biegeriegel, erreichte die Temperatur in den zwei Messbereichen nicht einmal 30°C.

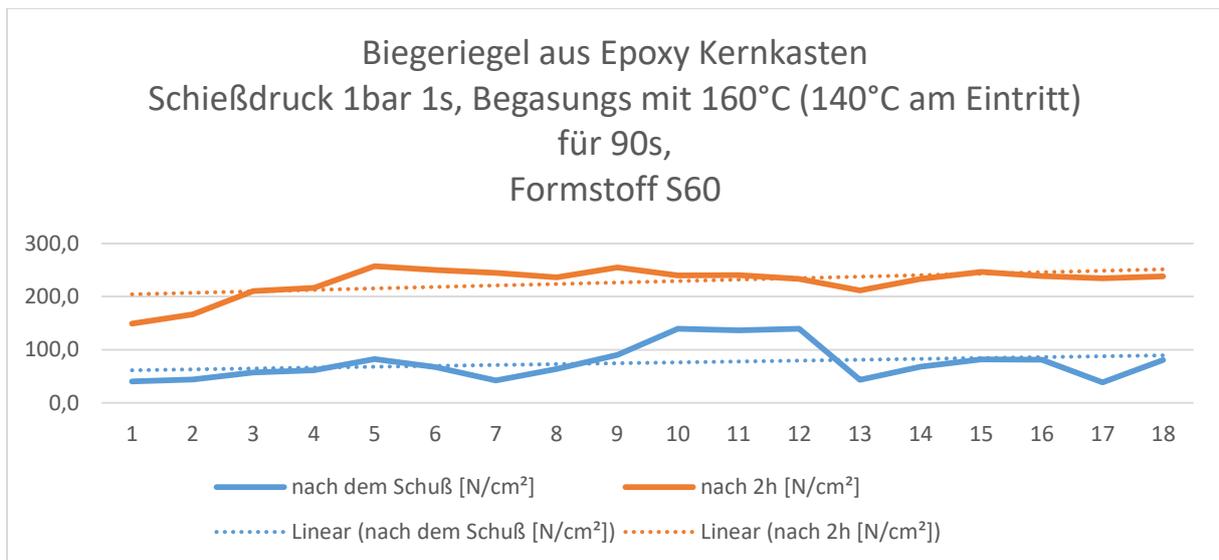


Abbildung 12-17: Ergebnisse Versuchsreihe aus Epoxidharzwerkzeug

Das unerwartet geringe Aufheizen der Werkzeughälften hatte die Folge, dass die Begasungszeit auf 90s erhöht werden musste, um eine vollständige Aushärtung zu erreichen.

Im Handling war dieses Material perfekt, da das Gewicht auf Grund der geringen Dichte im Vergleich zum Aluminiumkernkasten deutlich geringer ausfiel.

Um eine etwaige Verformung bzw. ein Wachstum der Werkzeuge zu detektieren wurden die Werkzeughälften vor und nach der Fertigung gegen die 3D Daten gescannt. Das Werkzeug wies Ungenauigkeiten von der Fräsbearbeitung auf, welche für den Versuchszweck jedoch vernachlässigt werden kann. Der leichte Auftrag im hundertstel Bereich nach der Fertigung lässt sich durch die Verwendung eines Modelltrennmittels auf Wachsbasis erklären, welches mittels Pinsel aufgetragen wurde. In der Praxis sollte hier auf andere Trennmittel zurückgegriffen werden. Eine Verformung bzw. Wachstum des Werkzeuges ist hingegen nicht erkennbar, was in dem gemessenen Temperaturbereich auch nicht anders zu erwarten war.

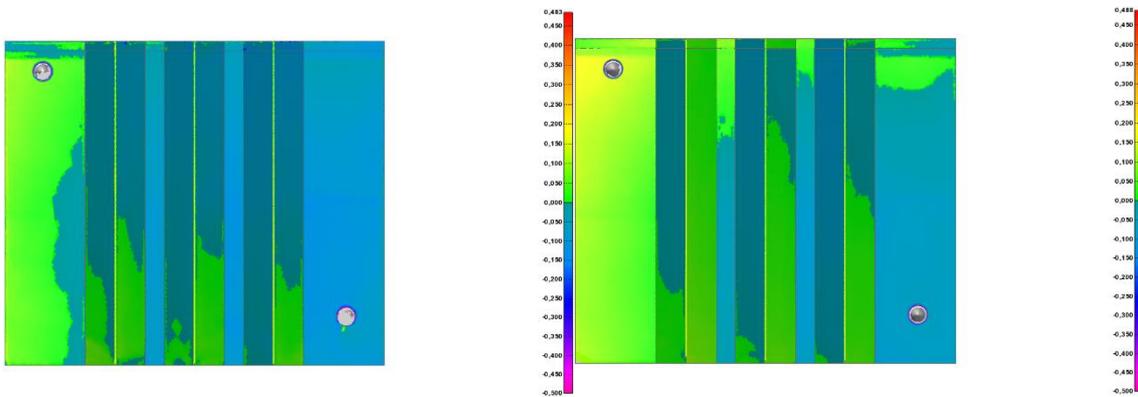


Abbildung 12-18: Scan der Werkzeughälfte (1) vor der Fertigung (li) / nach der Fertigung (re)

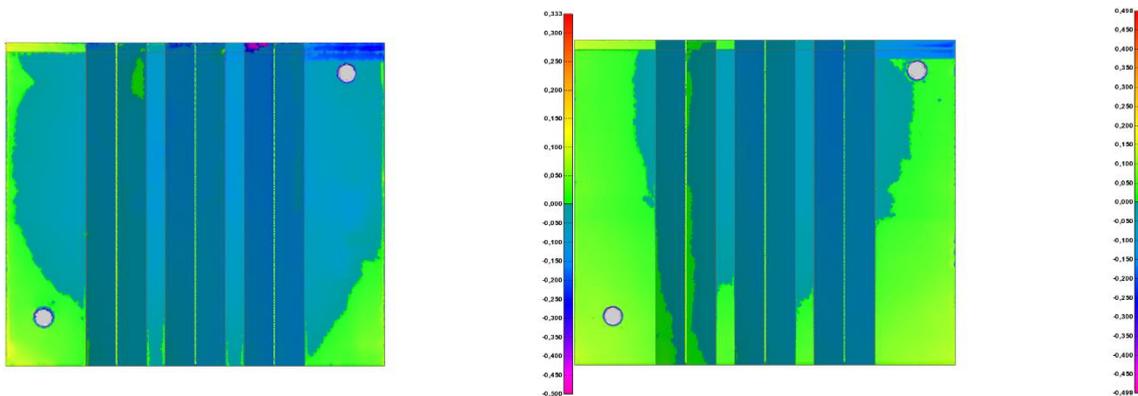


Abbildung 12-19: Scan der Werkzeughälfte (2) vor der Fertigung (li) / nach der Fertigung (re)

Im nächsten Schritt wurde das Blockmaterial unter die Lupe genommen.

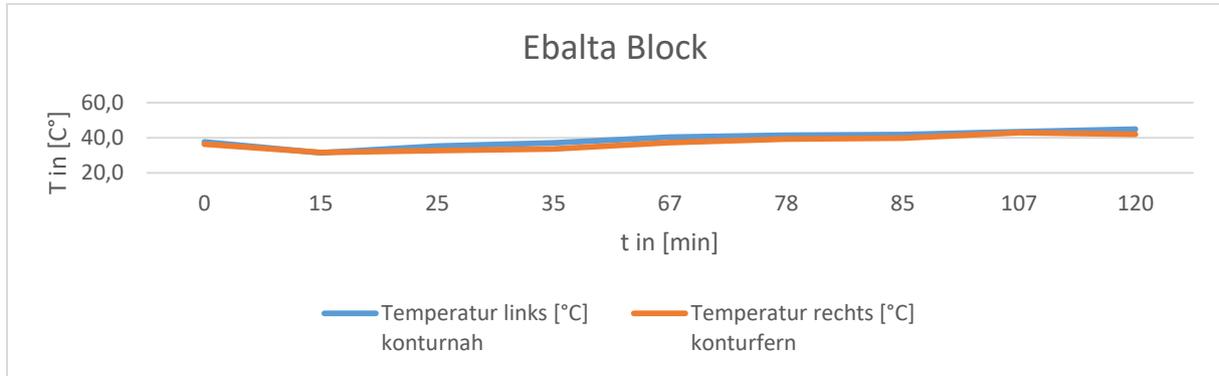


Abbildung 12-20: Ergebnisse Blockmaterial

Während der zweistündigen Fertigung erreichte das Material nicht ganz 50 °C, was zwar höher war als bei der Epoxidharz Platte, jedoch vom kritischen Bereich deutlich entfernt.

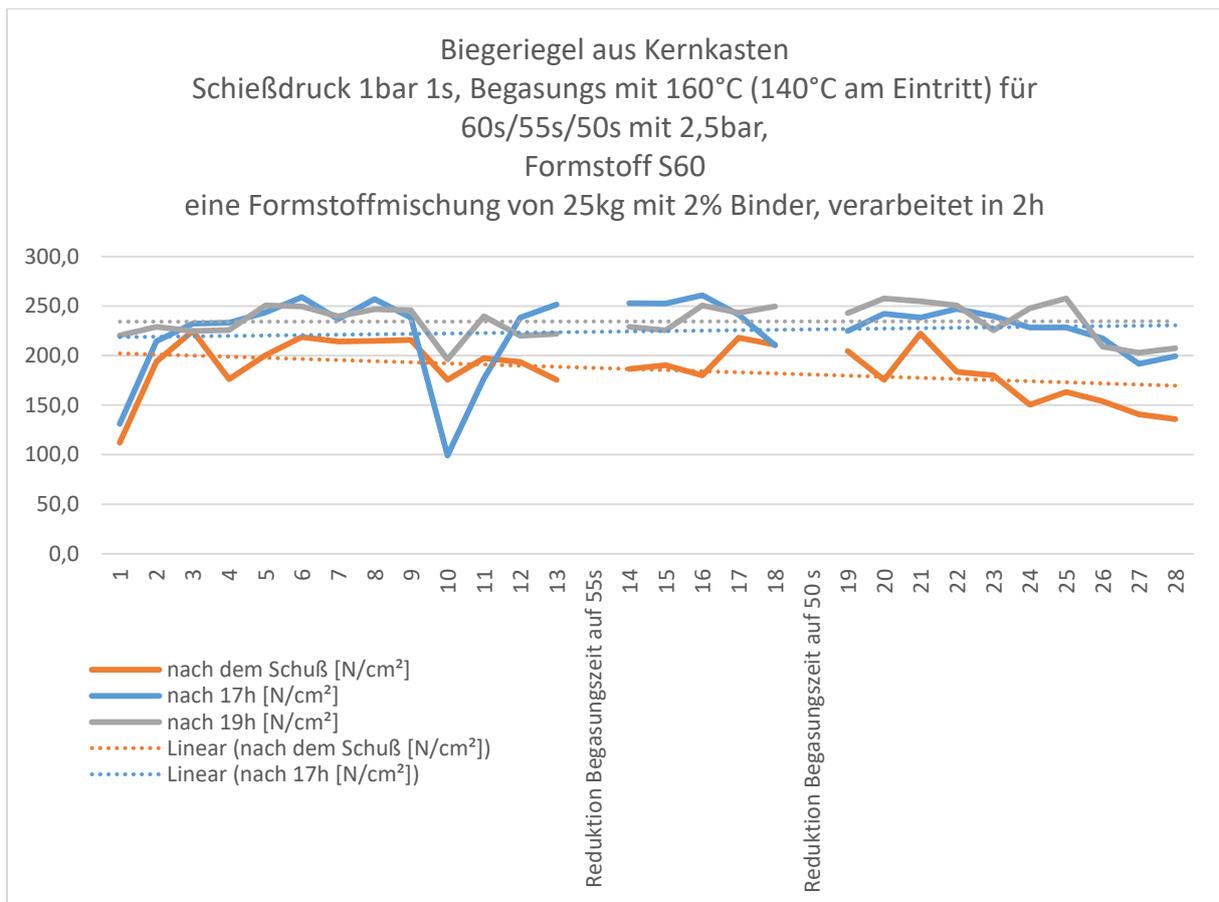


Abbildung 12-21: Ergebnisse Versuchsreihe aus Blockmaterialwerkzeug

Durch die etwas Bessere Wärmeleitfähigkeit konnte die Begasungszeit im Prozess kontinuierlich gesenkt werden, bis auf 50 s wie in den Vorversuchen. Dies lässt sich zwar einerseits auf die etwas höhere Werkzeugtemperatur zurückführen, aber es wurde zudem der Begasungsdruck von 1 bar auf 2,5 bar erhöht, wodurch die heiße Luft den Formstoff schneller durchdringt.

Wie beim Epoxidharz Kernkasten ist auch hier keine Verformung bzw. ein Wachstum des Werkzeuges erkennbar.

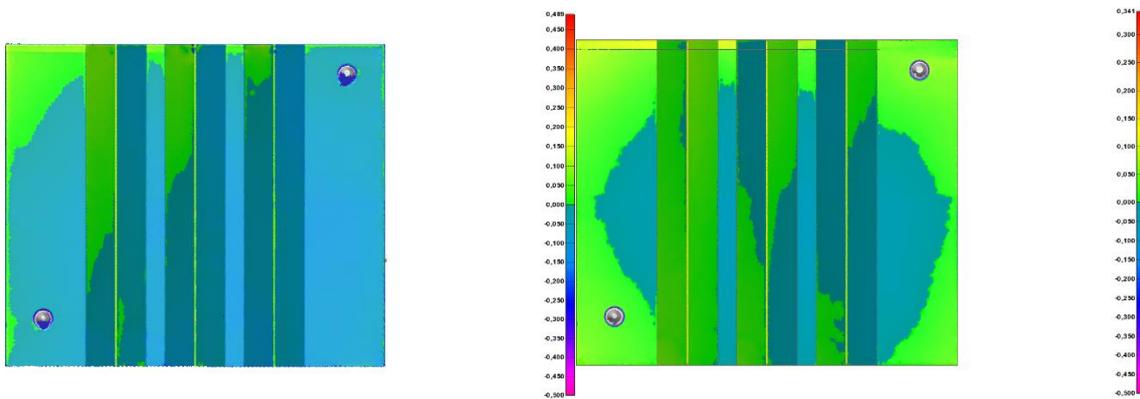


Abbildung 12-22: Scan der Werkzeughälfte (1) vor der Fertigung (li)/ nach der Fertigung (re)

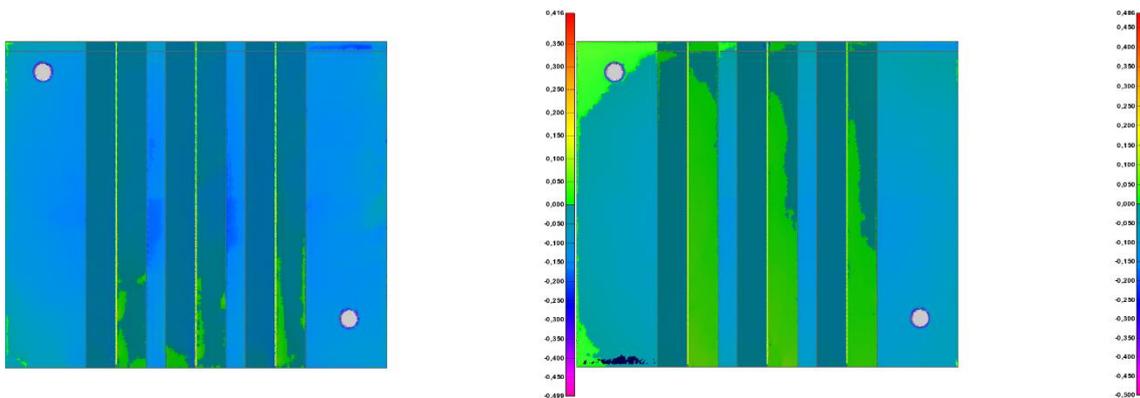


Abbildung 12-23: Scan der Werkzeughälfte (2) vor der Fertigung (li)/ nach der Fertigung (re)



13 Literaturverzeichnis PEAK

- [1] Svensson, I.L.: Chemistry and mechanical properties of carbon dioxide cured sodium silicate binders, Vortrag Nr. 4, 52, Internationaler Gießerei-Kongreß, Melbourne 1985
- [2] Osterberg, L., Anderson, W., Stoberiet 62, 1985, Nr. 6, S. 8–16 und GIESSEREI 73, 1986, Nr. 22, S. 657
- [3] Flemming, E., Schmidt, M., Hähnel, U., Ledwoin, E., Erfahrungen beim Einsatz von modifizierten Wasserglaslösungen, Gießereitechnik 35, 1989, Nr. 10, S. 299–302
- [4] Döpp, R., Schneider, H., Jürgens, H., Eigenfeld, K., Keidis, A., Gießversuche zum Wasserglas-CO₂-Verfahren – Teil 2, Betriebsversuche, GIESSEREI 76, 1989, Nr. 23, S. 799–802
- [5] Döpp, R., Schneider, H., Fortschritte des umweltfreundlichen Wasserglas-CO₂-Verfahrens zur Kern- und Formherstellung, Gießerei-Erfahrungsaustausch 1990, Nr.11, S. 465–467
- [6] Doroschenko, S. P., Makarevitsch, A. P., Formsande und Kernsande mit Wasserglasbindern, Probleme und Perspektiven, Vortrag 61. Gießerei-Weltkongreß, Peking 1995
- [7] Marachovec, L. N., Lemkow, J., Heißhärtende Formstoffmischungen mit modifiziertem Wasserglasbindemittel, Litejnoe Proizvodstvo, 1997, Nr. 10, S.12
- [8] Polzin, H.: Anorganische Binder zur Form- und Kernherstellung in der Gießerei Fachverlag Schiele & Schön Berlin, 2012
- [9] Europäisches Patent Nr. 2916976 – Verfahren zur Herstellung von verlorenen Kernen oder Formteilen zur Gussteilproduktion
- [10] Polzin, H.; Kooyers, T.: Anorganisches Kernbindersystem für den Eisenguss – ein neuer Ansatz, GIESSEREI 105, 2018, Nr. 10, S. 42-47
- [11] Deters, H., Müller, J.: Ökobilanz-Vergleich von Inotec, GIESSEREI 101, 2014, Nr.10, S. 80-82
- [12] Global Foundry Binder Market Study 2015-2015, 99Strategy Market Research, sample@99strategy.com



14 Versuchsdurchführung Pinter Guss Gefrierversuche mit Trockeneis und Herstellung additiv gefertigter Hohlformner

14.1 Kurzbeschreibung

Mit Versuchen im Rahmen des Projektes „Anorganisches Kernpaket“ soll gezeigt werden, dass Eiskerne unter Verwendung von Trockeneis in kurzen Produktionsintervallen hergestellt werden können. Dazu werden zylindrische Probekerne mit unterschiedlichen Wassergehalten versetzt und anschließend mit Trockeneis eingefroren. Die Ausbreitung des Temperaturfeldes in den Probekörpern wird zu jedem Zeitpunkt mit Thermoelementen gemessen und mit dem Datenlogger aufgezeichnet. Die Anordnung der Thermo-elemente berücksichtigt dabei eine radiale Verteilung über den Querschnitt der Probekörper. Darüber hinaus wurde die Versuchsreihe um die Herstellung von Eiskernen in realer Geometrie sowie deren Optimierung und Anwendung zur Herstellung von Sandkernen erweitert. Die Versuchsreihe erstreckt sich im Endzustand bis zum Abguss des gefertigten Sandkerns. Die Vorgehensweise bei der Temperaturmessung und die Auswertung der Ergebnisse werden in dieser Dokumentation erläutert. Alle weiteren Ergebnisse sind ebenfalls dokumentiert.

In einem zweiten Ansatz wurde die Herstellung von Hohlkörpern mittels additiver Fertigung untersucht. Dazu wurden schwammartige Strukturen in einem Filamentdrucker hergestellt. Mit diesem Ansatz soll untersucht werden, ob durch die Kompressibilität Hohlformner ohne Formschrägen und evtl. sogar mit Hinterschneidungen hergestellt werden können.

Ausgearbeitet von:

Moritz Bruhn, Joshua Bissels

15 Herstellung von Eiskernen unter der Verwendung von Trockeneis

Aufbauend auf den Versuchen des Fraunhofer IGCV zur Herstellung von Hohlkernen im Gefriertunnel mittels Eiskernen wurden Versuche zur Herstellung von Eiskernen unter Verwendung von Trockeneis zur Unterkühlung der Kernsandmischung durchgeführt. Ziel war es, einen Demonstrator für einen Serienkern herzustellen und diesen zu gießen.

15.1 Versuchsaufbau zur Messung des Abkühlverhaltens

Die Versuche wurden im Labor bei einer Raumtemperatur von 20 °C durchgeführt.

1. Vorbereiten der Form
2. Anmischen des Sand-Wasser Gemischs
3. Formen der Kerengeometrie
4. Verdichten der Sandmasse
5. Einfrieren der Kerne in Kühlbox
6. Messung der Temperaturgradienten
7. Entkernen

15.1.1 Kerngeometrie

Um die Messung der Temperaturgradienten zu erleichtern, wurde die Form eines Zylinders gewählt. Dazu wurde ein Stahlrohr (1.4301) auf eine Länge von 200 mm abgelängt und die Kanten entgratet. Vor den Versuchen ist sicherzustellen, dass die Innenflächen des Rohres gereinigt und entfettet sind

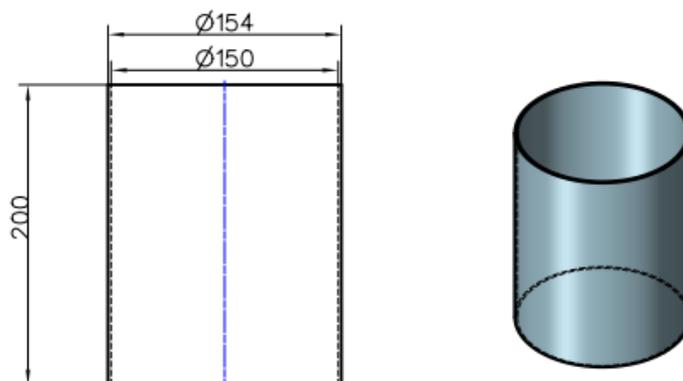


Abbildung 15-1: Zylindergeometrie

Für eine leichtere Entkernung nach dem Gefrieren, wurden die Wände der Zylinderform mit Trennspray (DemotexA) eingesprüht. Zu beachten ist, dass das Trennmittel gleichmäßig und

bei Raumtemperatur (20 °C) aufgetragen werden muss. Als Bodenplatte für die Zylinderform wurde ein Holzbrett der Stärke 5 mm verwendet.



Abbildung 15-2: Verwendetes Trennspray

15.1.2 Vorbereitung der Mischungen

In der nachfolgenden Tabelle sind die Zusammensetzungen der Sand-Wasser Gemische der unterschiedlichen Versuchsreihen aufgeführt.

Tabelle 15-1: Mischungsverhältnisse Sand / Wasser

Versuchsreihe	Quarzsandmenge	Wasser gew. %	Wassermenge
Versuch 1	3000 g	1 %	30 g
Versuch 2	3000 g	2 %	60 (61.33) g
Versuch 3	3000 g	4 %	120 (119.97) g
Versuch 4	3000 g	8 %	240 g



Abbildung 15-3: Quarzsand

Die in Tabelle 15-1: Mischungsverhältnisse Sand / Wasser aufgeführten Mengen wurden mit Hilfe einer Waage erzeugt. Danach wurde auch die benötigte Wassermenge auf der Waage abgemessen.

a)



b)



Abbildung 15-4: a) Quarzsand b) Wasser

Sand und Wasser wurden nun in einem Behälter vermischt. Um ein homogenes Gemisch zu erhalten, wurde ein Rührgerät und ein Akkuschauber verwendet (Abbildung 15-5).

a)



b)

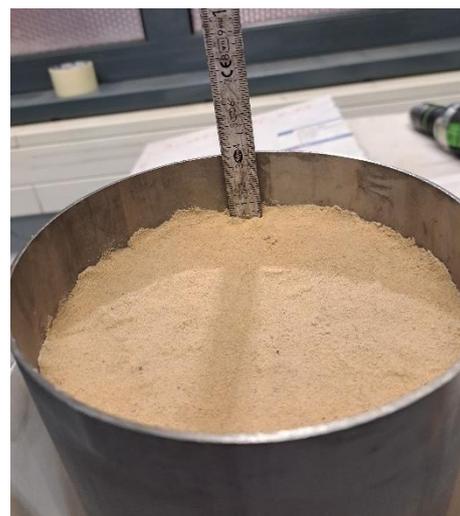


Abbildung 15-5: a) Mischung mit Akkuschauber b) Verdichtung und Überprüfung der Höhe



15.1.3 Versuchsdurchführung

Im Anschluss an die Herstellung der Mischungen werden diese in die Zylinderform eingebracht und mit einem Hammer oder von Hand verdichtet. Da in sämtlichen Versuchsreihen die gleichen Sandmengen zum Einsatz kamen, können vergleichbare Randbedingungen angenommen werden. Um einen stets gleichen Verdichtungsgrad zu gewährleisten, wurden alle Mischungen auf eine definierte Füllhöhe verdichtet. Das verdichtete Gefüge weist gegenüber dem unverdichteten eine höhere Wärmeleitfähigkeit und eine bessere mechanische Festigkeit auf. Des Weiteren ist die Oberflächenstruktur der verdichteten Sandmasse deutlich feiner und damit dem realen Kern angenähert.

Die Symmetrie der Zylinderform erlaubt die Messung eines halben Zylinders zur Bestimmung der Kernparameter. Bei einer gleichmäßigen Trockeneisverteilung kann von einem radialsymmetrischen Temperaturfeld im Eiskern ausgegangen werden. Es wurden vier Messpunkte definiert, an denen die Thermoelemente eingeführt wurden. Vor dem Einbringen der Thermoelemente in den Sand wird auf jedem Element die erforderliche Einstecktiefe markiert.

Es ist zu beachten, dass die Einstecktiefe weder zu groß noch zu klein gewählt wird. Eine zu große Einstecktiefe birgt das Risiko, dass die Probe nicht mehr gerade im Sand steckt. Es besteht die Möglichkeit, dass die Thermoelemente beispielsweise die Wand des Stahlrohrs berühren und dadurch die Abkühlrate zu hoch wird. Eine zu geringe Eintauchtiefe birgt das Risiko, dass das Thermoelement aus dem Sand herausfällt.

Tabelle 15-2: Platzierung Thermoelemente

Thermoelement	Abstand vom Inneren Rand	Tiefe im Sand
Channel 1	19 mm	60 mm
Channel 2	38 mm	60 mm
Channel 3	56 mm	60 mm
Channel 4	75 mm	60 mm



Abbildung 15-6: Platzierung der Thermoelemente

Nach dem Einbringen der Thermoelemente in den Sandkern wird der Probekörper in eine mit Trockeneis gefüllte Styroporbox gelegt. Damit die Temperaturfront symmetrisch in den Körper eindringen kann, wird das Trockeneis auf der Außenseite des Stahlrohres bis zur Füllhöhe des Sandes aufgeschichtet.

Um eine möglichst gute Isolierung des Systems zu erreichen, wurden in den Deckel der Styroporbox kleine Schlitz für die Thermoelemente eingearbeitet, in die die Elemente eingedrückt werden, so dass sie das Schließen des Deckels nicht behindern. Die Temperaturwerte wurden mit einem Datenlogger der Firma Graphtec (GL220) mit einem Messwert pro Sekunde aufgezeichnet.

15.1.4 Entformen

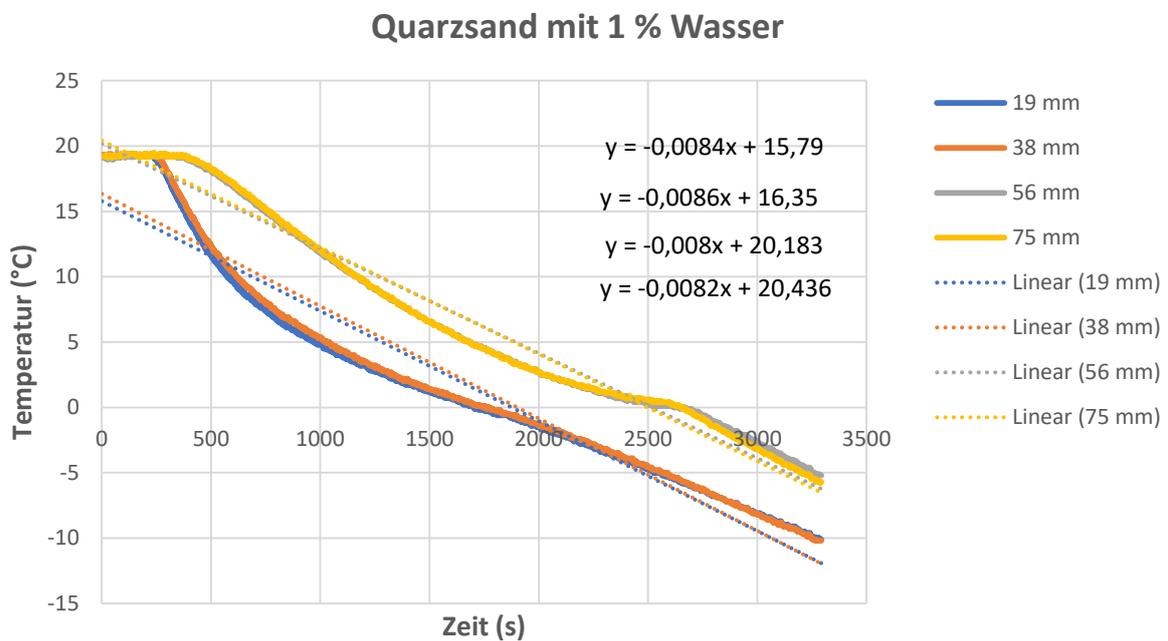
Die Messungen wurden fortgesetzt, bis mindestens das Thermoelement in der Mitte der Sandform einen negativen Wert anzeigte. In dieser Messreihe wurde auch nach Unterschreiten des Gefrierpunktes weiter gemessen. Nach Unterschreiten des Gefrierpunktes sollte der Kasten wieder geöffnet und der Bohrkern entnommen werden. Nun sollte der Kern aus dem Rohr geschlagen werden. Dazu mussten Hämmer eingesetzt werden, da sich die Kerne trotz Trennspray nur schwer lösen ließen. Hier zeigte sich bereits, dass der Glättegrad der Oberfläche einen entscheidenden Einfluss auf die Haftung hat. Alternativ können die Kerne auch mehrere Stunden bei Raumtemperatur aufgetaut werden. Danach kann der Sand getrocknet und wieder verwendet werden.

15.1.5 Datenauswertung

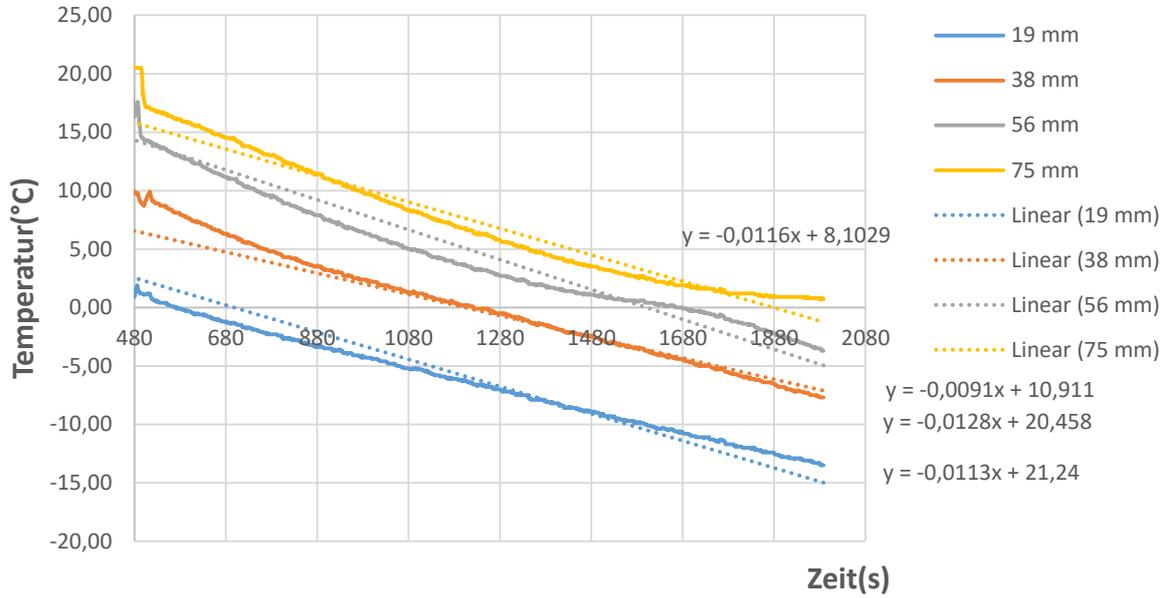
Die Temperaturänderungen wurden analysiert und die Entformbarkeit bewertet. Trockeneisverbrauch usw. wurden zunächst nicht betrachtet.

Temperaturänderung

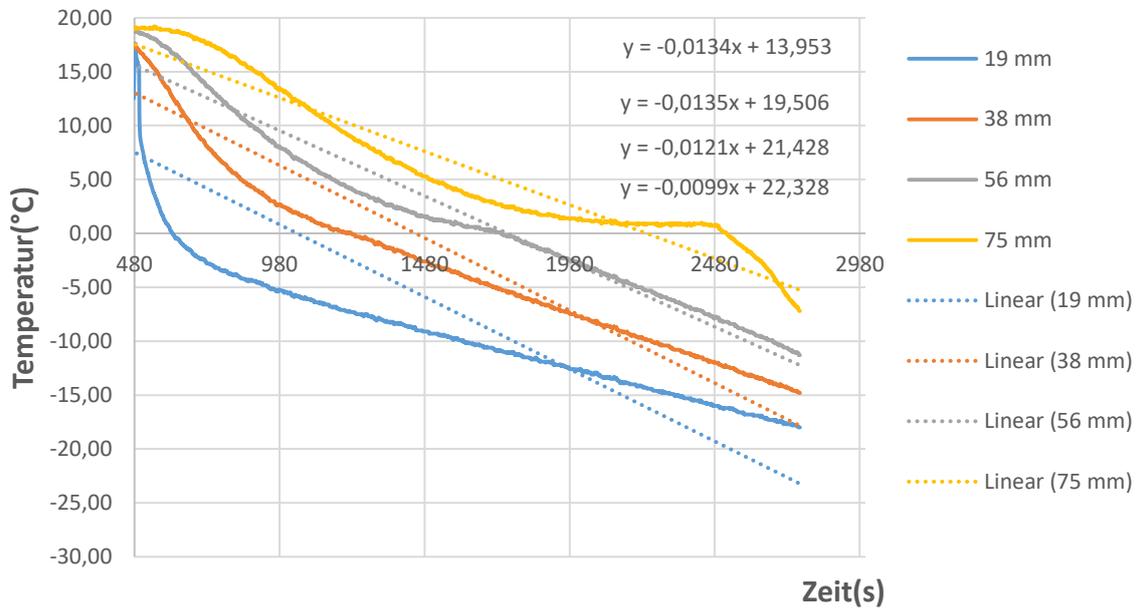
Der Datenlogger hat die Temperaturwerte über die gesamte Zeit aufgenommen. Eingestellt war dabei eine Abtastrate von einem Messwert pro Sekunde.



Quarzsand mit 2% Wasser



Quarzsand mit 4 % Wasser



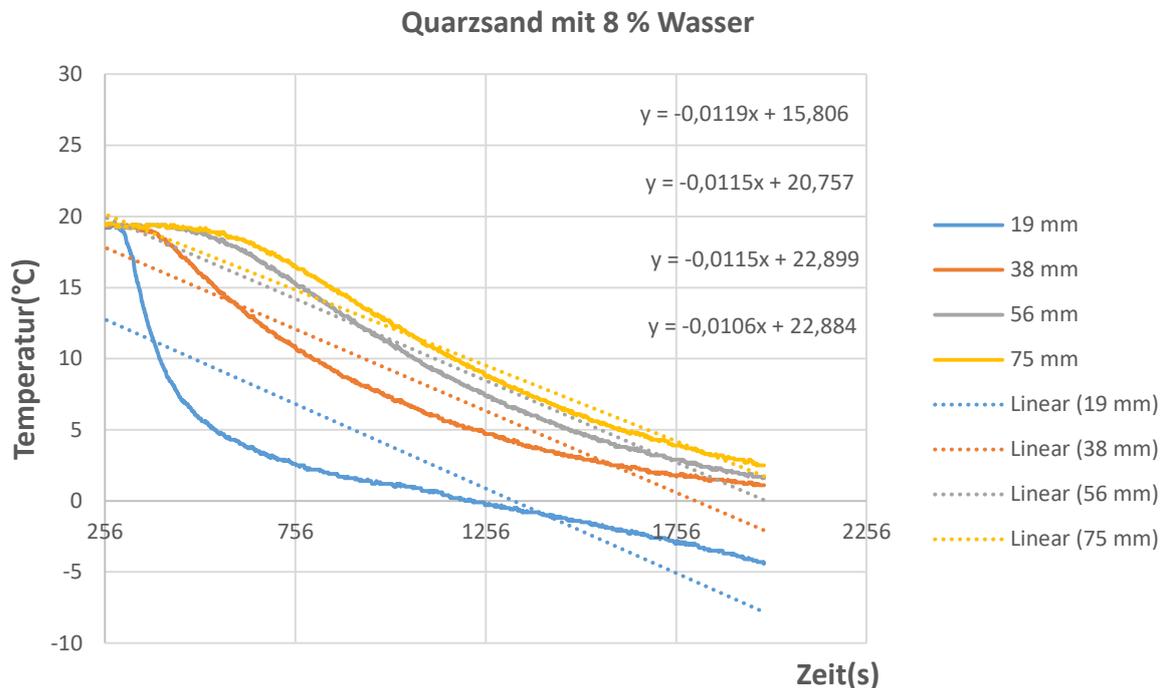


Abbildung 15-7 : Messreihen der Temperatur im Probezylinder

Die dargestellten Bereiche der Diagramme sind jeweils so angepasst, dass nur die relevanten Abkühlvorgänge sichtbar sind. Alle Einfahrvorgänge oder Temperatureaufzeichnungen während der Versuchsvorbereitung wurden aus den Auswertungen ausgeschlossen. Diese hätten die Darstellung der Ergebnisse nur verfälscht.

Die in den Diagrammen erkennbaren Temperaturverläufe wurden anschließend in zwei Bereiche unterteilt. Für die Bereiche über 0 °C und unter 0 °C wurden Gradienten berechnet. Damit soll verhindert werden, dass die schnelle Abkühlung zu Beginn und in Wandnähe die mittlere Abkühlrate verfälscht. Für eine einfache Prozessprognose sollten möglichst einfache lineare Zusammenhänge verwendet werden. Der Phasenübergang wurde zunächst vernachlässigt. Außerdem sollte eine Vorkühlung des Sandes in Betracht gezogen werden, da die Abkühlung größerer Sandmengen von Raumtemperatur auf Gefrieretemperatur sehr zeitaufwendig ist. Abkühlraten um 20 °C wären für die Messung jedoch völlig irrelevant. Relevanter ist das Verhalten der Gemische um und unter dem Gefrierpunkt.

Die gemessenen Abkühlraten sind in Tabelle 15-3 und Tabelle 15-4 aufgeführt.

Tabelle 15-3: Abkühlraten bei $T > 0\text{ °C}$

Abkühlrate $T > 0$ [°C/s]	1% Wasser	2% Wasser	4% Wasser	8% Wasser
19mm	-0,0128		-0,1166	-0,0163
38mm	-0,0126		-0,0236	-0,0093
56mm	-0,0088		-0,0157	-0,0074
75 mm	-0,0088		-0,0106	-0,0068

Tabelle 15-4: Abkühlraten bei $T < 0\text{ °C}$

Abkühlrate $T < 0$ [°C/s]	1% Wasser	2% Wasser	4% Wasser	8% Wasser
19mm	-0,0065		-0,0074	-0,0064
38mm	-0,0068		-0,0094	-0,0099
56mm	-0,0083		-0,0108	-0,0223
75mm	-0,009		-0,0287	-0,0572

Die Abkühlgeschwindigkeit ist in jeder Messreihe zu Beginn und in Wandnähe am größten. Danach wird die Abkühlung zum Zylinderzentrum hin immer langsamer. Wird der Gefrierpunkt unterschritten, kühlen die Randschichten im Vergleich etwas langsamer ab und die zentrumsnahen Schichten nähern sich in ihrer Temperatur immer mehr denen des Randes an. Die Abkühlgeschwindigkeit unter den Gefrierpunkt nimmt etwa um eine Zehnerpotenz ab.

15.1.6 Entformungsverhalten

Hinsichtlich des Entformungsverhaltens lassen sich aus den bisherigen Versuchen nur qualitative Aussagen ableiten. So zeigt sich erwartungsgemäß, dass die Entformung mit steigendem Wassergehalt immer schwieriger wird. Sowohl der Kern mit 4% Wasser als auch der Kern mit 8% Wasser sind sehr stark gefroren und müssen mehrere Stunden absetzen, bevor sie ohne Kraftaufwand entformt werden können. Die Kerne mit 1% bzw. 2% Wasser lassen sich deutlich schneller entformen. Das Trennspray haftet an den Wänden, Sandreste bleiben haften und müssen anschließend von Hand entfernt werden.



Generell muss festgestellt werden, dass die äußerste Randschicht sehr schnell anfängt zu tauen und damit wieder brüchig wird. Tiefere Schichten bleiben dagegen auch bei Berührung hart und gefroren. Eine Entformung durch kurzzeitige Temperierung der Kernwand ist daher denkbar.

15.1.7 Bewertung

Die Zielsetzung der durchgeführten Messungen bestand in der Ermittlung von Richtwerten für die zu veranschlagende Zeitdauer für die Herstellung von Eiskernen. Dies lässt sich aus den erfassten Gradienten ableiten. Wie bereits erwähnt, ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich der Zeitaufwand deutlich erhöht, sobald der Sand von Raumtemperatur abgekühlt wird. Eine wesentlich interessantere Vorgehensweise wäre die Lagerung des Sandes bereits vorgekühlt und die anschließende Abkühlung unter den Gefrierpunkt. Es bleibt jedoch fraglich, ob sich größere Stückzahlen wirtschaftlich realisieren lassen.

Ein weiteres Problem stellt die Entformung der Sandkerne dar. Direkt nach dem Einfrieren ist eine Entformung nicht möglich. Alle Kerne, unabhängig vom Wassergehalt, kleben stark in der Form. Trotz Trennspray muss entweder Zeit zum Auftauen aufgewendet werden oder die Kerne müssen gewaltsam aus der Form gelöst werden. Eine Entformung der Eiskerne erscheint jedoch aufgrund der starken Haftung nur schwer realisierbar. In diesem Zusammenhang sollten zukünftig noch Versuche mit geteilten Formen durchgeführt werden.

15.2 Vorversuche eines Eiskerns für eine Realgeometrie

15.2.1 Vorbereitung

Im nächsten Schritt wurde ein realer Kern eingefroren, um die an den Probegeometrien ermittelten Werte anwenden zu können. Als Kernform dienen in diesem Fall zwei 1,5 mm dicke Formbleche, die in eine dafür vorgesehene Stahlbodenplatte eingelegt werden.

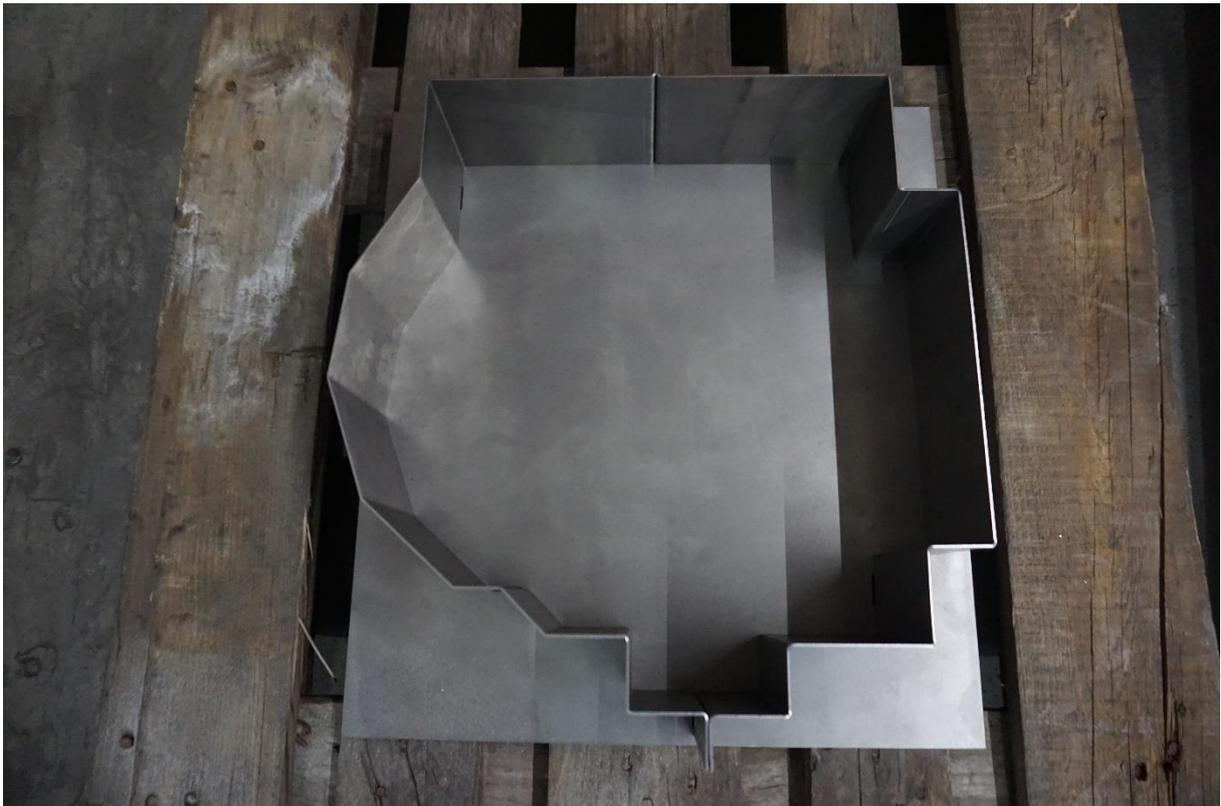


Abbildung 15-8: Blechform zur Eiskernherstellung

Um eine Verformung oder Trennung der Form für den Eiskern zu verhindern, wurden Nasen an der Unterseite der Bleche angebracht, welche die Positionierung in der Bodenplatte sichern. Des Weiteren wurden die beiden Hälften der Blechformen an den gegenüberliegenden Seiten miteinander verschraubt. Im Anschluss wurde der Formstoff gewogen und homogen gemischt. Aufgrund der Vorergebnisse des IGCV zu den Festigkeiten von Eiskernen sowie eigener Erfahrungen wurde ein Gewichtsanteil Wasser von 3 % für die Eiskernherstellung gewählt.

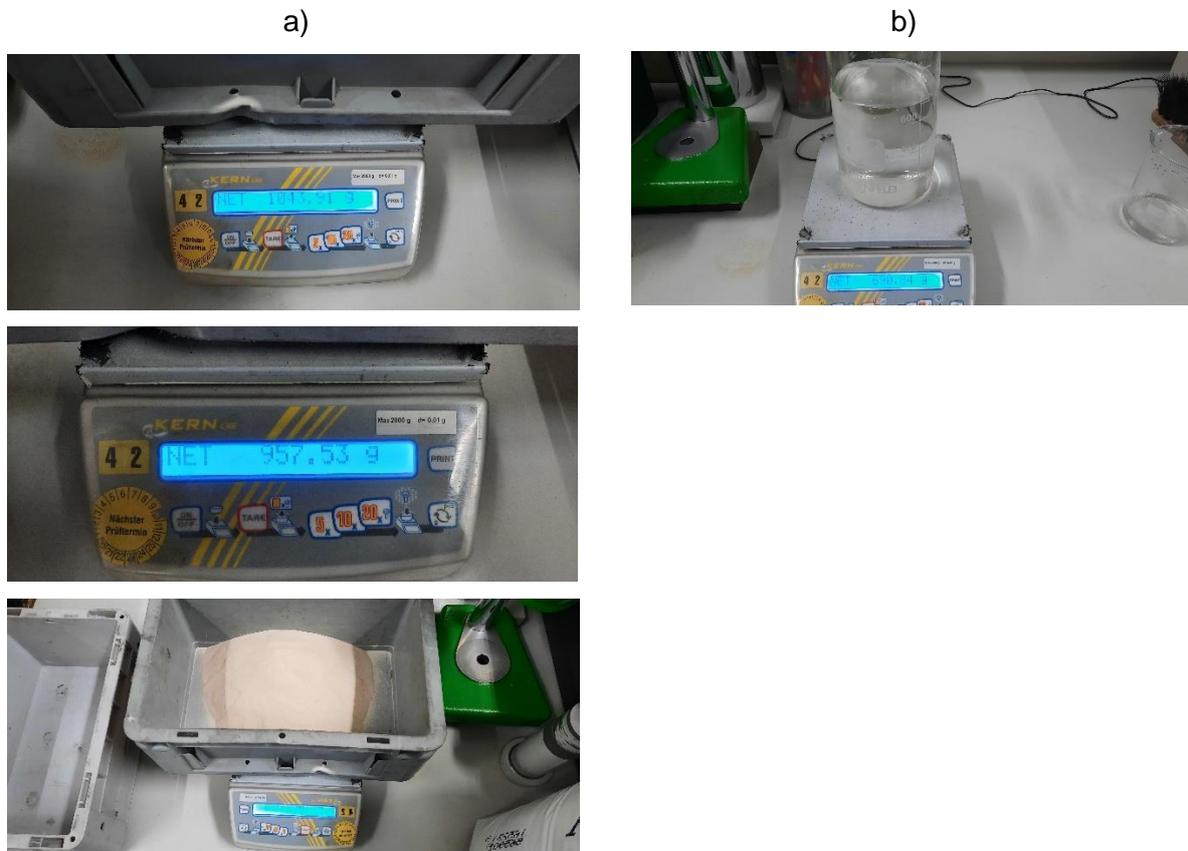


Abbildung 15-9: a) Quarzsand abgemessen b) Wasser abgemessen

Eine Überschlagsrechnung ergab, dass für das Volumen des Kerns rund 22 kg Sand benötigt würden. In der Folge wurde festgelegt, eine Mischung mit 23 kg Sand unter Berücksichtigung eines gewissen Überschusses herzustellen. Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, wurden 2 kg Sand aus dem Sack entnommen. In der Folge wurden 690 g Wasser in einem Becherglas gewogen (siehe Abbildung 15-9).

Zur Herstellung der Kerne wurde unter Produktionsbedingungen in der Kernmacherei ein Arbeitsplatz aufgebaut. Dazu wurden Sand und Wasser in zwei separaten Gefäßen bereitgestellt. Um eine optimale Vermengung des Sandes zu gewährleisten, wurde dieser bereits in einer großen Mörtelwanne zum Arbeitsplatz transportiert. Die Kernform befindet sich auf einer Europalette (siehe Abbildung 15-10).



Abbildung 15-10: Palette mit Kernform, Wasser und Sand in Produktionsumgebung

15.2.2 Durchführung

Nachdem der Arbeitsplatz und die Arbeitsmittel bereitgestellt worden waren, konnte mit der Formung des Kerns begonnen werden. Zu Beginn musste die Mischung aus Sand und Wasser hergestellt werden. Hierzu wurde das abgemessene Wasser zum Sand in die Mörtelwanne gegeben. Um eine Homogenität des Gemisches zu erhalten, wurde dieses danach 15 Minuten lang vermengt und durchgeknetet. Zu Beginn wurde ein Rührquirl verwendet, im Anschluss erfolgte die manuelle Verarbeitung.



Abbildung 15-11: Sand Wasser Gemisch mit 3%-Wasseranteil

Nach der vollständigen Homogenisierung des Gemisches konnte mit der Formfüllung begonnen werden. Der Sand wurde händisch in die Form chargiert und dabei regelmäßig von Hand vorverdichtet.



Abbildung 15-12: a) lose eingefüllter Sand b) Sand vorverdichtet

Im Rahmen der Vorverdichtung war es von entscheidender Bedeutung, den Sand so homogen wie möglich in alle Ecken der Form zu pressen, um einen gleichmäßig dichten Kern zu erstellen, der anschließend mit einheitlicher Geschwindigkeit eingefroren werden kann. Dabei war jedoch darauf zu achten, die Form durch den eingebrachten Druck nicht nach außen zu beulen. Diese Arbeitsschritte wurden so lange wiederholt, bis die Blechform vollständig mit Sand gefüllt war. Da im späteren Anwendungsfall zwei dieser Kerne übereinanderzusetzen sind, musste die Deckfläche noch sauber abgezogen werden.

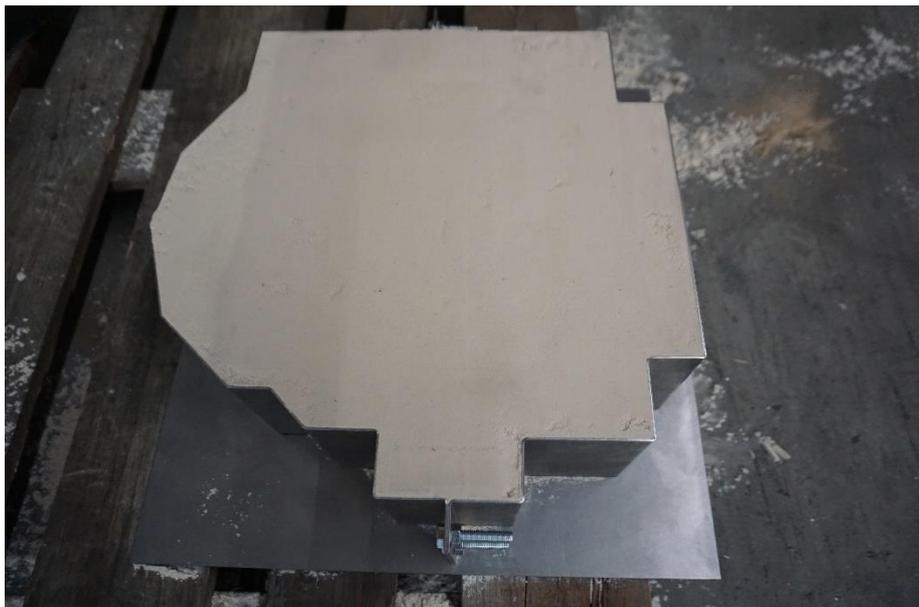


Abbildung 15-13: fertig abgestrichener Eiskern

Abgezogen wurde der Kern in diesem Fall mit einem einfachen 50 x 50 mm vierkant Hohlprofilstahl. Um auch in diesem Kern einen Temperaturverlauf ermitteln zu können, wurden

in den Kern Thermoelemente eingebracht, welche an einen Datenlogger angeschlossen wurden. Die Thermoelemente wurden alle auf dieselbe Tiefe in den Kern eingesteckt. Die Thermoelemente wurden jeweils auf einer Tiefe von 6 cm abgemessen, mit einem Permanentmarker markiert und auf die halbe Kerntiefe (6 cm) eingesteckt. Des Weiteren wurden fünf Thermoelemente am Rand des Kerns mit einem Abstand von jeweils 4 cm angebracht.

a)



b)



Abbildung 15-14: a) Staffelung Thermoelemente b) Thermoelement auf 6 cm abgemessen

Zuletzt wurde der fertig bestückte Eiskern dann in einen mobilen Trockeneiscontainer gelegt und von allen Seiten mit Trockeneis bedeckt, sodass die Wärme des Sandes schnell entzogen werden kann. Sobald die Messung gestartet war, wurde der Deckel geschlossen und der Kern eingefroren.

a)



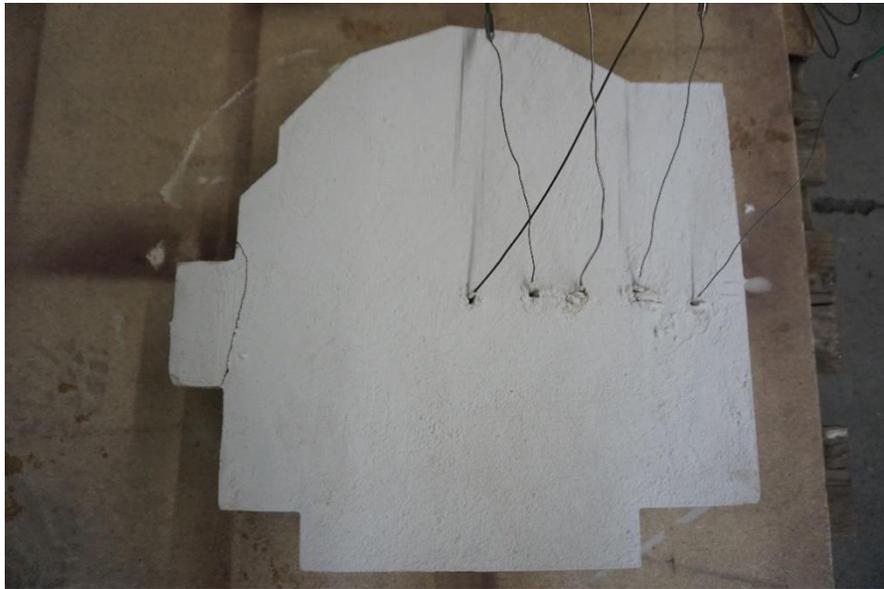
b)



Abbildung 15-15: a) Form im Container b) Messung der Temperaturverläufe

Da nicht nur das Einfrieren für den Anwendungsfall von Bedeutung ist, sondern auch das Auftauverhalten eine wichtige Rolle spielt, wurde der Kern über ein Wochenende in der Produktionshalle stehen gelassen und eine neue Messung gestartet, die die Temperaturverläufe während des Auftauens ermitteln sollte. Dafür wurde der Eiskern entformt

und an der Luft stehen gelassen. Zu Dokumentationszwecken wurden in der ersten Stunde im 10 Minuten-Takt Bilder vom Kern gemacht (siehe 15.2.4 Auftauen).



*Abbildung 15-16: Entformter und gefrorener Eiskern
Beim Entformen des Kerns sind in diesem Fall Probleme aufgetreten. Wie in*

Abbildung 15-16 zu sehen ist, brach der Kern an einer Stelle beim Versuch, diesen aus der Blechform zu lösen. Zudem hatte sich eine größere Anhaftung am Boden der Blechform gebildet, die ebenfalls bei der Entnahme aus der Form aus dem Kern ausgebrochen ist.



Abbildung 15-17: Ausbruch am Boden der Blechform

Beide aufgetretenen Fehlstellen hätten voraussichtlich bei Verwendung eines Trennmittels, wie in den Vorversuchen eingesetzt, vermieden werden können.

15.2.3 Datenauswertung

Aus den zuvor beschriebenen Messungen wurden folgende Daten gewonnen.

Gesamttemperaturverläufe

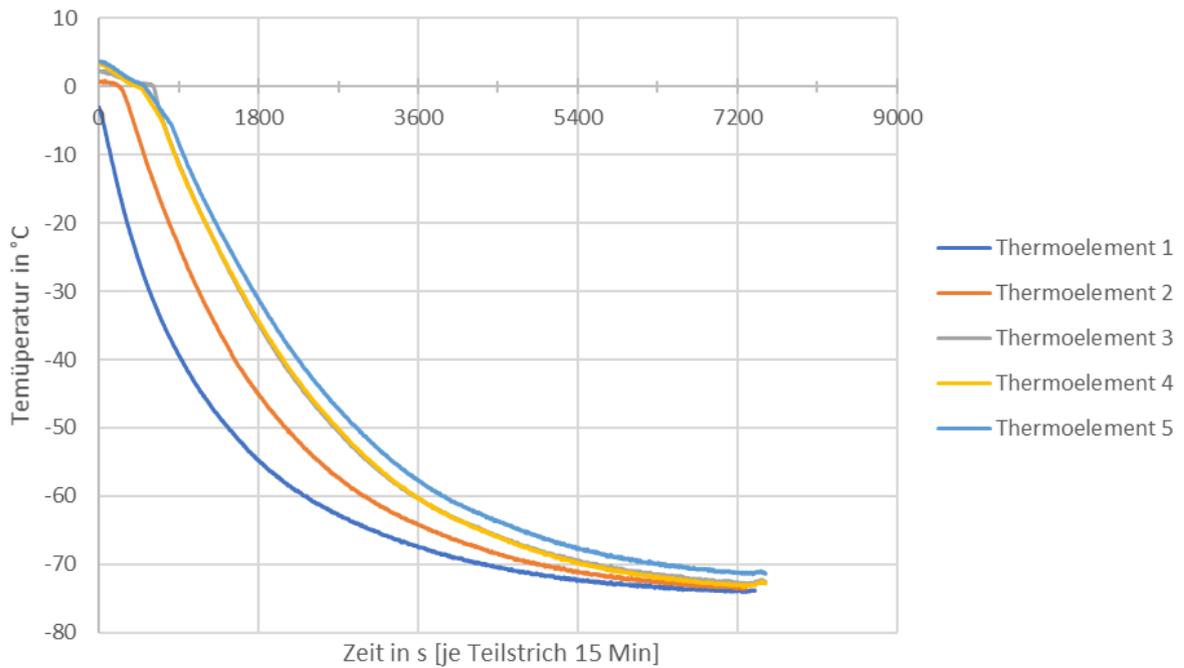


Abbildung 15-18: Temperaturverlauf einfrieren

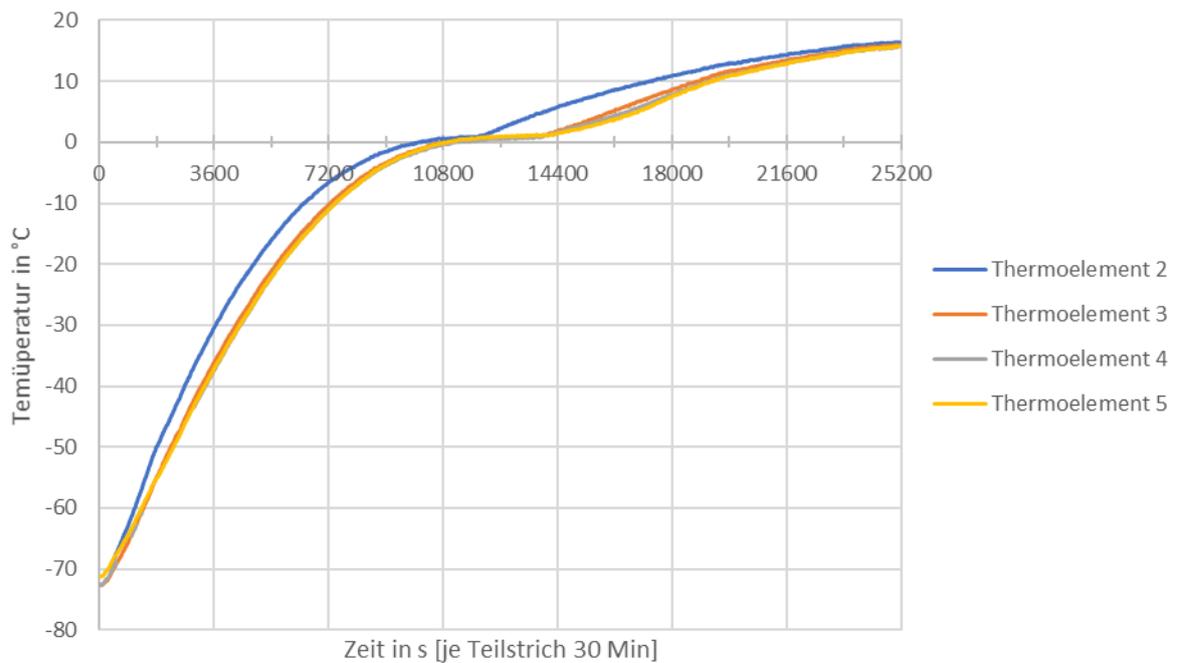


Abbildung 15-19: Temperaturverlauf auftauen

Abbildung 15-18 und Abbildung 15-19 zeigen die Gesamtverläufe der durchgeführten Messungen. Zu beachten ist, dass bei der Messung des Abkühlvorgangs eine Abtastrate von 1/s verwendet wurde, während bei der Messung der Auftauzeit eine Abtastrate von 1/20 s verwendet wurde. Dies wurde lediglich zur Reduzierung der Datenmenge angewendet, da die Messung über ein gesamtes Wochenende vorgenommen wurde. Da der Kern relativ schnell aufgetaut war, wurden zur Verbesserung der Anschaulichkeit die Werte über 15 °C abgeschnitten, da der Kern ab diesem Zeitpunkt nicht mehr verwendbar ist.

Einteilung von Temperaturbereichen

Um die gemessenen Werte sinnvoll verwenden zu können, müssen die Verläufe linear genähert werden.

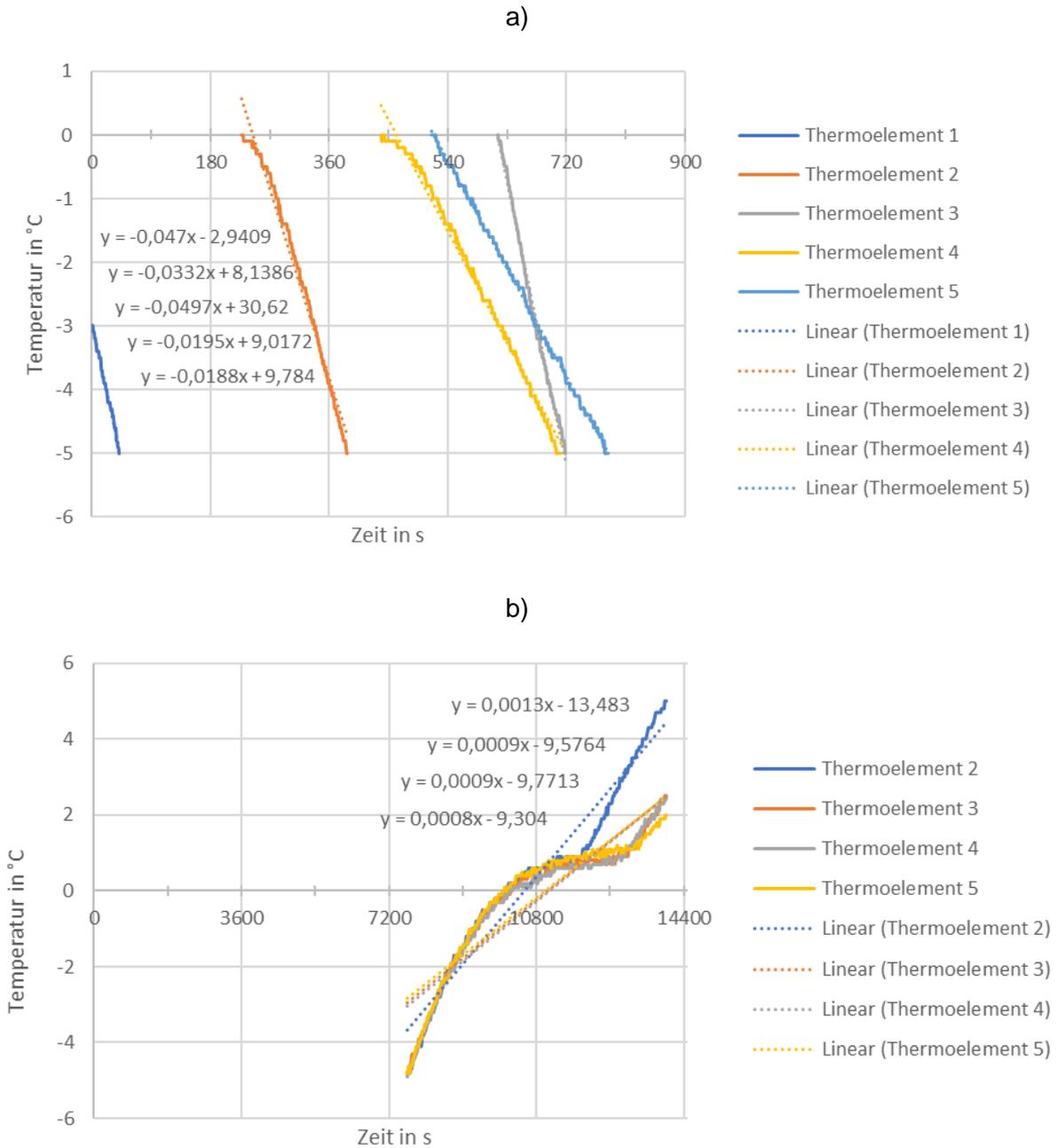


Abbildung 15-20: Temperaturverläufe -5 °C bis 5 °C a) einfrieren b) auftauen

Da eine lineare Näherung über den gesamten Verlauf der Messung zu ungenau wäre, wurden die Messungen in drei Unterräume unterteilt. Gewählt wurden hierfür die Temperaturintervalle von 5 bis -5 °C, -5 bis -40 °C und -40 bis -75 °C.

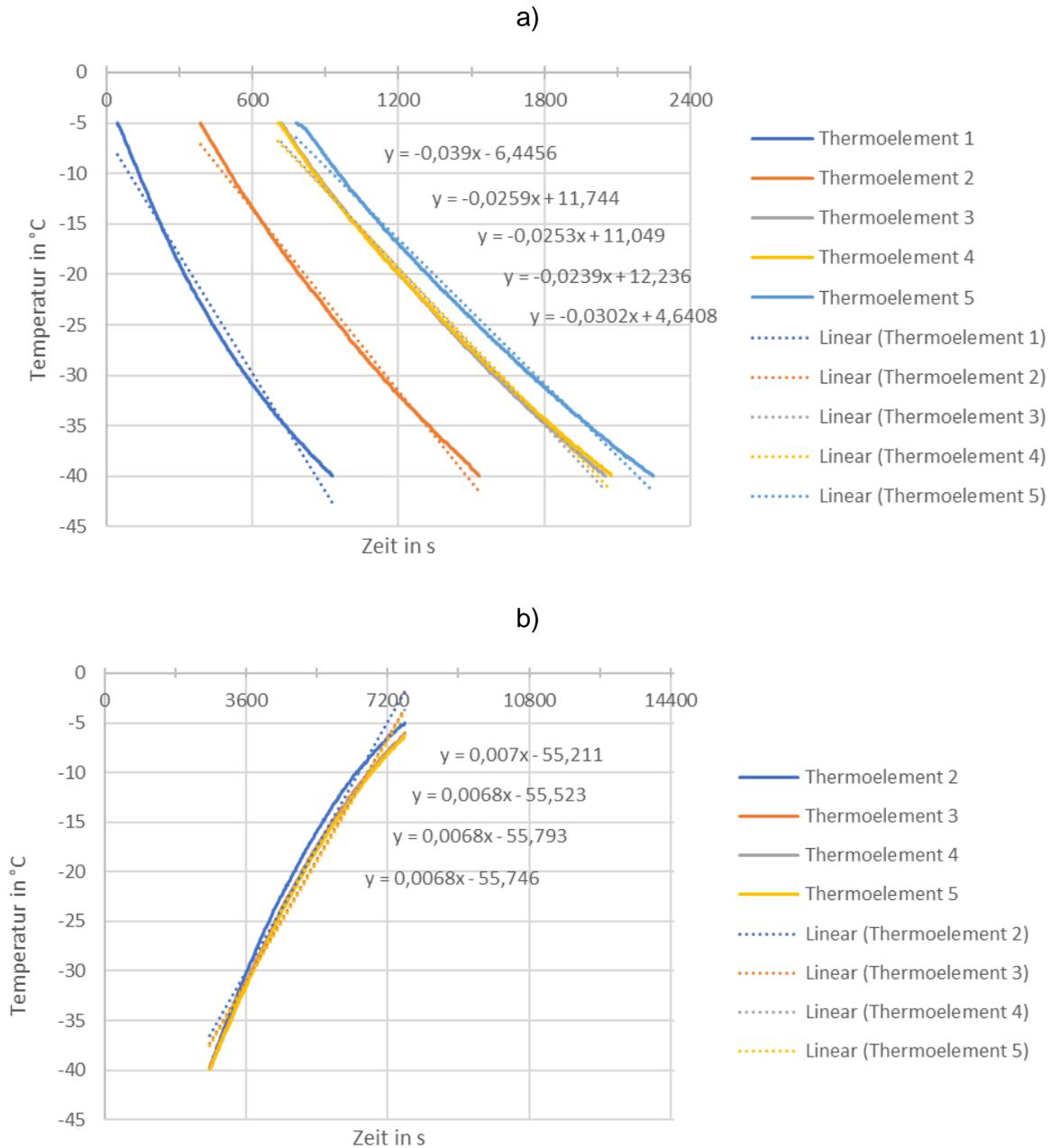


Abbildung 15-21: Temperaturverlauf -40 °C bis -5 °C a) einfrieren b) auftauen

Mit den kleinen Teilsystemen werden die Näherungen deutlich verbessert. Zudem kann der Bereich von -40 °C bis -75 °C so separat betrachtet werden, da dieser nur in wenigen Fällen tatsächlich von Relevanz sein wird.

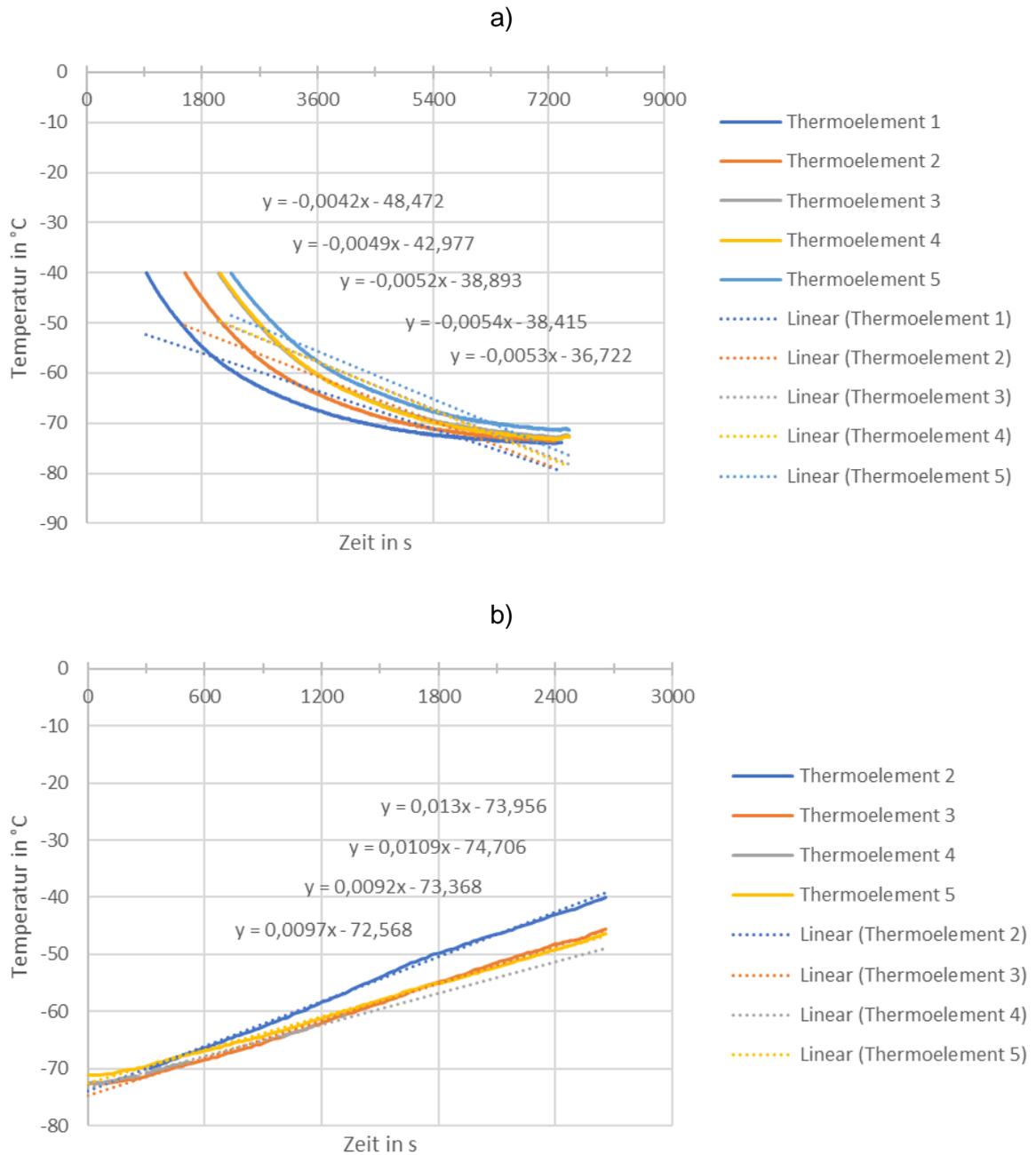


Abbildung 15-22: Temperaturverlauf -75 °C bis -40 °C a) einfrieren b) auftauen

Abkühlraten

Tabelle 15-5: Abkühlrate °C/s

Abkühlrate in °C/s	TE 1 (4 cm)	TE 2 (8 cm)	TE 3 (12 cm)	TE 4 (16 cm)	TE 5 (20 cm)
0 °C bis -5 °C	-0,047	-0,0497	-0,0332	-0,0195	-0,0188
-5 °C bis -40 °C	-0,039	-0,0302	-0,0259	-0,0253	-0,0239
-40 °C bis -75 °C	-0,0042	-0,0049	-0,0052	-0,0054	-0,0053

Tabelle 15-6: Abkühlrate °C/min

Abkühlrate in °C/min	TE 1 (4 cm)	TE 2 (8 cm)	TE 3 (12 cm)	TE 4 (16 cm)	TE 5 (20 cm)
0 °C bis -5 °C	-2,82	-2,982	-1,992	-1,17	-1,128
-5 °C bis -40 °C	-2,34	-1,812	-1,554	-1,518	-1,434
-40 °C bis -75 °C	-0,252	-0,294	-0,312	-0,324	-0,318

Auftauraten

Tabelle 15-7: Auftaurrate °C/s

Auftaurate in °C/s	TE 1* (4 cm)	TE 2 (8 cm)	TE 3 (12 cm)	TE 4 (16 cm)	TE 5 (20 cm)
-75 °C bis -40 °C	-	0,013035	0,01091	0,0102	0,009865
-40 °C bis -5 °C	-	0,006985	0,006605	0,00663	0,00659
-5 °C bis 5 °C	-	0,00128	0,00095	0,000945	0,000855

Tabelle 15-8: Auftaurrate °C/min (*TE1 Thermoelement defekt)

Auftaurate in °C/min	TE 1 (4 cm)	TE 2 (8 cm)	TE 3 (12 cm)	TE 4 (16 cm)	TE 5 (20 cm)
-75 °C bis -40 °C	-	0,7821	0,6546	0,612	0,5919
-40 °C bis -5 °C	-	0,4191	0,3963	0,3978	0,3954
-5 °C bis 5 °C	-	0,0768	0,057	0,0567	0,0513

Die angeführten Temperaturänderungen aus 0 und 0 wurden mittels Trendlinien in Excel errechnet. Es wurden in den beschriebenen Bereichen lineare Ausgleichsgraphen ermittelt. Alle Thermoelemente sind 6 cm tief, also bis auf die halbe Kernhöhe in den Kern eingeführt worden. Die Anordnung ist in Abbildung 15-14 zu erkennen.

15.2.4 Auftauen

Nachdem die Kerne vollständig durchgefroren waren und sich die Temperatur einer Sättigung genähert hatte, wurden zu Dokumentationszwecken Bilder vom Auftauvorgang gemacht. Hierbei kann man gut erkennen, wie sich die Randschichten farblich abheben, wenn sie auftauen. Beispielhaft sind hier die farblichen Unterschiede eines Kerns nach 20 Minuten Tauzeit und nach 60 Minuten Tauzeit dargestellt.



Abbildung 15-23: Kern nach Tauzeit a) 20 Minuten b) 60 Minuten

Es lässt sich deutlich erkennen, dass der Tautvorgang in den Ecken, den Stellen mit dem schlechtesten Oberflächen- zu Volumenverhältnis, seinen Anfang nimmt. In diesem Zusammenhang wäre zu überlegen, in Zukunft die Ecken abzurunden, um die Wärmeabgabe zu verringern. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass ein Handling in den ersten 30 Minuten ohne nennenswerte Einbußen der Kerngeometrie möglich ist. Unter der Voraussetzung, dass der Hüllkern um den Eiskern innerhalb der genannten Zeitspanne gefertigt werden kann, ist die Stabilität des Eiskerns ausreichend, um die gewünschte Hohlform zu erzeugen.

15.3 Fertigung eines Hohlkerns am Beispiel eines Serienbauteils (Iteration 1)

Mit dem Wissen und den Erzeugnissen der zuvor aufgeführten Versuche wurden nun Hohlkerne hergestellt. Im Folgenden wird dokumentiert, wie dies umgesetzt wurde.

15.3.1 Material

1. Formsand im CO₂-Resolverfahren

Eiskern zur Ausformung der Hohlkerne (

2. Abbildung 15-16)
3. Kernkasten für Innenraum-Kern (Abbildung 15-24)

4. Werkzeug

15.3.2 Vorbereitung

Um den Hohlkern fertigen zu können, mussten zunächst Eiskerne hergestellt werden. Diese wurden, wie unter 15.2.2 Durchführung beschrieben, angefertigt und bis zur Nutzung in Trockeneisboxen aufbewahrt. Verwendet wurde ein Sand-Wasser-Gemisch mit einem Gewichtsanteil von drei Prozent Wasser. Drei aus vier Versuchen Eiskerne mit einem Wasseranteil von zwei Gewichtsprozent herzustellen, scheiterten weil die Kerne brachen.

Bis dato wurden drei Hohlkerne gefertigt. Im ersten Versuch unter Verwendung nur eines Eiskerns und in den anderen zwei Durchgängen unter Verwendung zweier Eiskerne. Einer mit der vollen Höhe der Blechform (116 mm, Abbildung 15-8) und einer der die Blechform nur bis zur halben Höhe gefüllt hat. Der Kernkasten wurde an den Arbeitsplatz gebracht und auseinandergelassen, sodass man ihn befüllen kann. Der vorhandene Hohlformner wurde bei diesem Versuch nicht verwendet.

15.3.3 Durchführung

Der vertikal geteilte Kernkasten liegt auf einer Seite.



Abbildung 15-24: geöffneter Kernkasten

Im ersten Schritt wird der erste Eiskern in die Form eingelegt. Im Anschluss wird das Sand-Binder-Gemisch rund um den Eiskern in die Form gefüllt. In den Versuchen zwei und drei erfolgt nun die Einlage des zweiten Eiskerns. Im Anschluss erfolgt eine Verdichtung des Sandes. Nachdem die erste Formhälfte vollständig gefüllt ist, wird die zweite Hälfte des Kernkastens aufgesetzt und die Form geschlossen. Im Anschluss wird der Kernkasten mithilfe eines Krans aufgestellt.



Abbildung 15-25: gefüllte Formhälfte

Der Eiskern wurde zur sicheren Platzierung festgehalten. Anschließend wurde von oben die zweite Hälfte des Kernkastens mit Sand gefüllt. Der Kernkasten wurde zur Begasung angeschlossen und der Kern härtete aus.

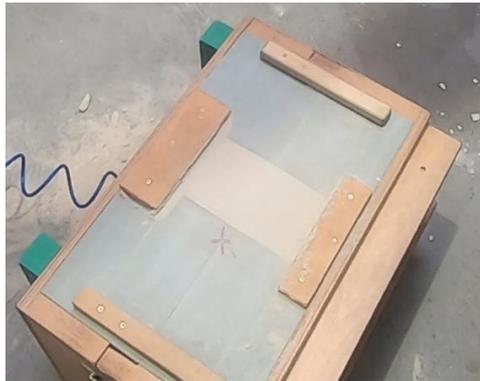


Abbildung 15-26: Begasung des Kernkastens

Daraufhin wurde der Kernkasten wieder geöffnet und der Kern aus der Form entnommen. Zum Abtauen wurde der Kern in der Halle bei Produktionsbedingungen über Nacht stehen gelassen. Am nächsten Morgen konnte der getaute Eiskern einfach ausgekratzt werden.

a)



b)



Abbildung 15-27: Hohlkern, a) Aussaugen des losen Sandes, b) Innenraum Hohlkern

Dies geschah von Hand und anschließend mit einem Industriesauger.



Abbildung 15-28: Industriesauger, Nilfisk Attix 44-2H IC

15.3.4 Ergebnis

Der Hohlkern des ersten Versuches mit einem Eiskern war erfolgreich (siehe Abbildung 15-27). Die Gewichtseinsparung ist ca. um den Faktor 3,2 größer als bei dem derzeit verwendeten Hohlformer (



Abbildung 15-29: Hohlkern mit feuchtem Fleck nach einer Nacht

Tabelle 15-9). Der Sand konnte von Hand leicht entfernt werden und auch die Entsandung mittels Sauger war problemlos möglich.



Abbildung 15-29: Hohlkern mit feuchtem Fleck nach einer Nacht
Tabelle 15-9: Einsparung Formstoff im Vergleich zwischen klassischem Hohlformer und Eiskernverfahren am Beispiel des Serienbauteils

Variante	Einsparfaktor
$\frac{\text{Volumen Eiskern}}{\text{Volumen Hohlformer}}$	3,269

Der Hohlkern weist jedoch deutliche Feuchtigkeitsränder auf, die auf eine unzureichende Trocknung hindeuten. Auch die Außenwand ist rundum angefeuchtet, sodass der Kern vor Verwendung zunächst vollständig austrocknen müsste. Eine ausreichende Lagerung oder eine gezielte thermische Trocknung kann Abhilfe schaffen. Bei den Durchgängen zwei und drei kam es während der Fertigung zu einer Zerstörung beider Hohlkerne. Im zweiten Durchgang kam es bei der Entnahme des Kerns aus dem Kernkasten zu einem Riss im Kern.

a)

b)



Abbildung 15-30: Kern genau an der Verdichtungsschicht des Unterkastens gerissen

Der CO₂-Eintrag des Eiskerns in den Formsand sowie die lange Prozesszeit führten dazu, dass der Kernsand bereits gebunden war, bevor sich die gesamte Form zu einer Hülle verbinden konnte.

Im Rahmen des dritten Durchgangs kam es zu einer Verrutschung des Eiskerns in der Form. Der Eintrag von CO₂ aus dem Trockeneis führte zudem dazu, dass der Kernsand bereits zu fest war, um eine vollständig verbundene Außenhülle zu bilden. Dies lässt den Schluss zu, dass auch hier ein Riss des Kerns sicher gewesen wäre.

Somit konnte demonstriert werden, dass die Herstellung von Hohlkernen mit Eiskernen prinzipiell möglich ist. Die kontrollierte Fertigung ist jedoch bis dato nur schwer möglich, da das CO₂ aus dem Trockeneis den Binder im Sand zu schnell reagieren lässt. Infolgedessen ist die Wahrscheinlichkeit eines Kernbruchs durch unzureichende Bindung als hoch einzustufen.

15.4 Versuche zur CO₂ Speicherung der Eiskerne

In den vorangegangenen Versuchen konnte beobachtet werden, dass das CO₂ aus den Eiskernen den Formsand im CO₂-Resolverfahren zu einem vorzeitigen Zeitpunkt bindet. Dies kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden: Entweder ist das gespeicherte CO₂ im Eiskern dafür verantwortlich oder das anhaftende Trockeneis. Im Rahmen dieses Experiments wurde eruiert, auf welche Weise dieser Umstand am effektivsten adressiert werden kann.

15.4.1 Versuchsaufbau

Verwendetes Material

1. Eimer
2. Form Sand mit Resol-Binder
3. Eiskern

Alle Materialien wurden vorbereitet. Der Formsand wurde in einem Eimer mit Deckel vor Luftkontakt geschützt. Außerdem wurden zuvor Eiskerne bereitgestellt. Verwendet wurden einfache Quader mit den Außenmaßen 18 cm x 18 cm x 11 cm.

15.4.2 Durchführung

In den Eimer wurde eine dünne Bodenschicht Sand eingefüllt (ungefähr 3 cm). Anschließend wurden die Eiskerne aus dem Trockeneis entnommen. Es wurden vier verschieden-behandelte Eiskerne in den Formsand gegeben.

Tabelle 15-10: Eiskernvarianten zum CO₂ Versuch

Versuch	1	2	3	4
Behandlung	direkt aus Trockeneis in den Formsand (Referenz)	10 Minuten Lüften bei Umgebungstemperatur	Reichliches Abblasen mit Druckluft	Abreiben mit Keramikschaum und Abblasen

Nachdem der Eiskern vollständig mit Formsand umschlossen war, wurde er 10 Minuten in dem Sandbett gelassen.



Abbildung 15-31: Eiskern Block im Form Sand

Nach einer Zeitspanne von zehn Minuten wurde der Eimer entleert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Entnahme des Sandes kontrolliert, erfolgte. Der Formsand wurde entfernt, bis lediglich der Eiskern mit dem gebundenen Formsand übrigblieb. Im Anschluss wurde der Eiskern aufgetaut. Die Schalen, die sich um den Eiskern gebildet hatten, blieben als übrige Bestandteile zurück. Diese wurden daraufhin auf ihre Dicke vermessen.

15.4.3 Ergebnisse

Bereits unmittelbar nach der Entnahme konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden. Der Kern aus Versuch 1 wies eindeutig die größten Sandanhaftungen aus der Versuchsreihe auf (2 cm dicke Schale). Im Anschluss wurde der Kern, der mit Druckluft abgeblasen wurde (1 cm dicke Schale), untersucht. Demgegenüber wiesen die Kerne, die zuvor ausgelüftet oder mit der Keramik abgerieben worden waren, nur geringe bis gar keine Anhaftungen auf.



Abbildung 15-32: Schalenbildung verschiedener Eiskerne im Formsand (Von links nach rechts Versuch 1 – 4 Tabelle 15-10)

15.4.4 Bewertung

Der Versuch hat gezeigt, dass vor allem die Anhaftungen von Trockeneis an den Eiskernen für das Aushärten des Formsands verantwortlich sind. Der unbehandelte Kern, an dessen Oberfläche am ehesten noch Trockeneisreste geklebt haben, hat die dickste Formsandschale gebildet. Der mit Druckluft abgeblasene Kern hat weniger Anhaftungen gebildet. Die Bildung von Anhaftungen konnte lediglich in einem geringen Umfang erzielt werden, indem der Kern entweder so lange an der Luft war, bis alles Trockeneis sublimiert war, oder indem die oberste Schicht Sand, an welcher Trockeneis angefroren war, entfernt wurde. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Kern, der sich zuvor schon bei Raumtemperatur akklimatisiert hatte, deutliche Verluste in der Festigkeit aufwies. Die aushöhlende Wirkung der Eiskerne wird reduziert, da beim Stopfen die Konturen, vor allem im Bereich der Ecken und Kanten, verloren gehen. Eine mechanische Behandlung erweist sich daher als beste Option, um einer ungewollten Schalenbildung im Sandkern entgegenzuwirken.

15.5 Fertigung eines Hohlkerns am Beispiel eines Serienbauteils (Iteration 2)

15.5.1 Anpassungen am Versuchsaufbau und Durchführung

Im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen wurden geringfügige Modifikationen im Prozess vorgenommen. Anstelle von zwei kompletten Eiskernen (Höhe 11,7 cm), von denen einer lediglich eine Höhe von 7 cm aufwies, wurde ein weiterer Kern gefertigt. Der zweite Kern wurde geteilt und um drei Zentimeter in der Länge verkleinert, um im Kernkasten genug Platz zu schaffen, um den Formsand mit der Hand überall zu verdichten. Vor dem Einlegen der Eiskerne wurden diese mit einem Keramikschwamm leicht abgerieben und mit Druckluft abgeblasen. Der Eiskern wurde dieses Mal nicht über Nacht aufgetaut, sondern durch mechanische Bearbeitung mit dem Meißel und der Säge innerhalb von zwei Stunden nach der Fertigung entfernt. Der sonstige Fertigungsprozess wurde analog zu den vorangegangenen Versuchen ausgeführt.

15.5.2 Ergebnisse

Wie erhofft konnte im Kernkasten nun mehr Platz für das Verdichten des Formsands geschaffen werden. An zwei Stellen wurde die Form nicht richtig ausgefüllt, was allerdings nicht auf eine mangelhafte Zugänglichkeit zurückzuführen ist. Zudem hat der Formsand während des Fertigungsprozesses noch nicht gebunden. Beim Entformen ist der Kern nicht gerissen. Aufgrund des hohen Kerngewichts ist allerdings um die Aufhängeöse ein kleiner Riss entstanden, sodass die Aufhängung noch zu optimieren ist. Durch das vorzeitige Entfernen des Eiskerns hat der Hohlkern kaum Feuchtigkeit aufgenommen, was die Trockenzeit vor dem Abguss stark reduziert.



Abbildung 15-33: a) Risse an Aufhängeöse



b) Nicht richtig verdichteter Formsand



15.5.3 Fazit

Im weiteren Vorgehen soll eine neue, optimierte Eiskernform entwickelt werden, welche die Fertigungszeiten der Eiskerne verkürzt. Das Ziel ist die Schaffung eines möglichst großen Hohlraums bei gleichzeitiger Optimierung der Zugänglichkeit aller Stellen beim Verdichten. Des Weiteren ist zu untersuchen, ob durch den Einsatz unterschiedlicher Beschichtungen und Trennfolien eine Reduzierung des Anfrierens erzielt werden kann.

15.6 Folienversuche gegen Anhaftung

In den vorangegangenen Versuchen konnte wiederholt das Auftreten von Ausbrüchen an den Eiskernen beobachtet werden. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden verschiedene Anordnungen von Folien untersucht, die eine Beschädigung der Eiskerne verhindern sollen.

15.6.1 Versuchsablauf

Benötigtes Material:

1. Eiskern Form aus Stahlblech
2. Laminierfolie

Die Laminierfolie wurde entsprechend der gewünschten Bereiche der Bodenplatte zugeschnitten. Im Rahmen der Untersuchung wurden zwei unterschiedliche

Anordnung a):



Abbildung 15-34: gesamte Bodenplatte mit Folie bedeckt

Anordnung b):



Abbildung 15-35: paralleles Foliengitter
(2 cm Folie, 1,5 cm Spalt)

Folienanordnungen getestet.

Im Anschluss wurde die Folie auf der Bodenplatte befestigt und der Eiskern gefertigt. Im Anschluss wurde der Eiskern nach einer Trocknungszeit von 20 Minuten im Trockeneis entformt und die Oberflächenbeschaffenheit analysiert.

15.6.2 Ergebnisse

Es lässt sich deutlich erkennen, dass die Anhaftungen bevorzugt auf der Stahlplatte stattfinden. Bei Anordnung a) (Abbildung 15-34) sind keine Anhaftungen zu erkennen. Bei Anordnung b) (Abbildung 15-35) manifestieren sich die Anhaftungen in Bereichen, die nicht mit der Laminierfolie bedeckt sind, und erstrecken sich teilweise bis über die Ränder der Folie hinaus. Die Anhaftungen auf der Folie sind höchstwahrscheinlich auf die Verwendung von flüssigem Trennmittel, Demotex A (Abbildung 15-2)), zurückzuführen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Oberflächenrauigkeit den entscheidenden Faktor für die Anhaftungen darstellt. Die raue Stahlplatte führt zu Anhaftungen, während die glatte Folie Anhaftungen minimiert. Die Verwendung von flüssigem Trennspray führt zu einer rauen Oberfläche der Folie, da Staub aus der Luft daran gebunden wird. Dies wiederum begünstigt die Anhaftung von Schmutz.

Anordnung a):

*Abbildung 15-36: keine Anhaftungen auf der Folie*

Anordnung b):

*Abbildung 15-37: Anhaftungen Anordnung b)*

15.7 Trennmittelversuche gegen Anhaftung

In den vorangegangenen Versuchen konnte wiederholt das Auftreten von Ausbrüchen an den Eiskernen beobachtet werden. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden diverse Trennmittel evaluiert, deren Einsatz eine Schädigung der Eiskerne verhindern soll.

15.7.1 Versuchsablauf

Benötigtes Material:

1. Eiskern Form aus Stahlblech
2. Alu-Spray, Technofond Gießereihilfsmittel GmbH Art.-Nr. 600 (Abbildung 15-38)
3. Graphitspray, Technofond Gießereihilfsmittel GmbH Art.-Nr. 610 (Abbildung 15-39)
4. Graphitpulver, (Abbildung 15-40)



Abbildung 15-38: verwendetes Alu-Spray

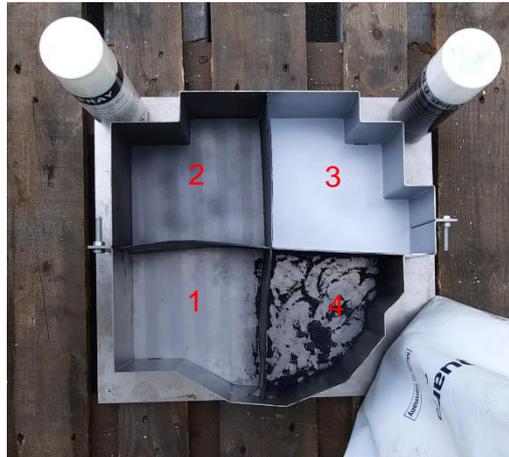


Abbildung 15-39: verwendetes Graphitspray



Abbildung 15-40: verwendetes Graphitpulver

Die Eiskern Form wurde in vier ungefähr gleichgroße Teile unterteilt (siehe Abbildung 15-41). Jede dieser vier Zonen wurde mit einem unterschiedlichen Trennmittel bearbeitet.



Zone 1: unbehandelte Zone

Zone 2: Graphitspray

Zone 3: Alu-Spray

Zone 4: Graphitpulver

Abbildung 15-41: Zonen mit unterschiedlichen Trennmitteln

Anschließend wurde der Eiskern eingefroren und danach wieder entformt. Das Alu-Spray und das Graphitspray wurden dünn und gleichmäßig direkt auf die Form aufgebracht. Das Graphitpulver wurde zuerst eingeschüttet und dann von Hand in der Form verteilt (Abbildung 15-41). Pulverreste wurden anschließend entfernt bis lediglich eine Schmierschicht in der Form zurückblieb. Nach 20 Minuten im Trockeneis wurden die Kerne entformt.

15.7.2 Ergebnisse

Nach der Entnahme wurden die Kernteile verglichen (vgl. Abbildung 15-42, Abbildung 15-43, Abbildung 15-44 und Abbildung 15-45). Das schlechteste Ergebnis lieferte das Viertel ohne jegliche Trennmittelbehandlung. Ein etwas kleinerer Ausbruch zeigte sich hingegen bei dem Viertel, welches mit Graphitspray behandelt wurde. Das Viertel mit dem Alu-Spray zeigt eine dünne gleichmäßige Schicht der Anhaftung, die jedoch nicht maßgeblich die Oberfläche des Eiskernes verschlechtert. Das beste Ergebnis mit nahezu keinen Anhaftungen erhielten wir im Viertel, das mit Graphitpulver behandelt wurde.

Zone 1: unbehandelt



Abbildung 15-42: Viertelkern ohne Trennmittel

Zone 2: Graphitspray



Abbildung 15-43: Viertelkern mit Graphitspray

Zone 3: Alu-Spray



Abbildung 15-44: Viertelkern mit Alu-Spray

Zone 4: Graphitpulver



Abbildung 15-45: Viertelkern mit Graphitpulver

15.8 Abguss eines mit Eiskernen geformten Hohlkernes

Unter der Berücksichtigung der zuvor gewonnenen Ergebnisse wurde ein vollständiger Hohlkern geformt und für den Abguss verwendet. Der Hohlkern konnte ohne Fertigungsprobleme hergestellt werden.

15.8.1 Vorbereitung der Gießform

Um ein Volllaufen des Hohlkern über die Kernmarke zu verhindern, wurde die Entnahmeöffnung für den Eiskern mit einer Kernplatte verschlossen (vgl. Abbildung 15-46: versiegelter Hohlkern). Diese wurde in den Hohlkern eingeklebt. Die Oberseite des Hohlkernes wurde außerdem geschichtet.



Abbildung 15-46: versiegelter Hohlkern

Anschließend wurde der Hohlkern mit Hilfe eines Kranes in den Unterkasten der Form eingesetzt (vgl. Abbildung 15-47).

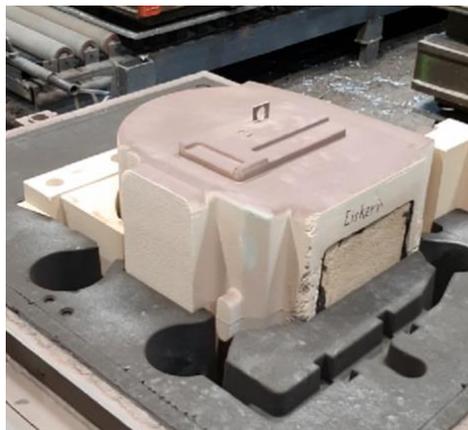


Abbildung 15-47: Hohlkern im Unterkasten

In diesem Zusammenhang sind vereinzelt Probleme aufgetreten. Der Eiskern neigte beim Absetzen dazu, in seiner Form zu kippen, was zu einer Beschädigung des Unterkastens geführt hätte. Dies hätte letztlich zu Ausschuss geführt. Nach mehreren Versuchen und einer Nachbearbeitung der entsprechenden Kerngegend konnte das Einsetzen schließlich erfolgreich durchgeführt werden. Im Anschluss wurde die Gießform mit dem Oberkasten verschlossen.

15.8.2 Abguss und Untersuchung

Der Abguss wurde mit einer strontiumveredelten Aluminiumsiliziumlegierung bei einer Schmelztemperatur von 725 – 745 °C abgegossen. Die Füllzeit entsprach den Werten der Serie. Das Bauteil zeigte nach dem Auspacken keine Auffälligkeiten im Vergleich zur Serie.



Untersuchung der Maßhaltigkeit

Das fertiggestellte Gussteil wurde mit einem Hexagon-Messarm vermessen und anschließend mit dem CAD-Modell des Bauteils verglichen. Der Abgleich erfolgte durch Einpassen der ermittelten Punktwolke in das CAD-Modell mittels Best Fit. Die vorhandenen Flächenabstände wurden gemessen. Unter Berücksichtigung einer zulässigen Toleranz von $\pm 1,0$ mm konnten Abweichungen der Istwerte von den Sollwerten für den Eiskern festgestellt werden.

Ergebnisse der Maßhaltigkeitsprüfung

Aufgrund bestehender Geheimhaltungsvereinbarungen konnten keine Bilder des Bauteils und der Messprotokolle bereitgestellt werden.

Es bestehen Abweichungen, die außerhalb der Toleranz liegen. Die Anordnung der Messpunkte sowie der Verlauf der Abweichungen lassen jedoch den Schluss zu, dass die generelle Maßhaltigkeit des Kerns nicht von den Eiskernen beeinflusst wurde. Die hier vorliegenden Toleranzüberschreitungen sind vielmehr auf eine Verkippung des Kerns in der Gießform zurückzuführen (vgl. 15.8.1 Vorbereitung der Gießform). Der Kern senkt sich demnach nach hinten ab, während sich der vordere Teil hebt. Diese Problematik manifestierte sich bereits in der Serie und konnte durch weitere Maßnahmen im Rahmen der Versuchsreihe verbessert werden.

Bei einem Vergleich des Mittelwerts der Abweichungen an den Messstellen mit Bauteilen ohne Eiskerneinlage zeigen sich keine besonderen Auffälligkeiten. Es wird angenommen, dass die Verkippung durch die Verschiebung des Massenschwerpunkts im Kern verursacht wird und möglicherweise auf einen fehlerhaften Einbau zurückzuführen ist.

Zur Evaluierung wurde ein Bauteil aus der Normalserie herangezogen, welches ohne Eiskern hergestellt wurde. Das Innenteil zeigt keine Anzeichen einer Verkippung.

Aufgrund der Tatsache, dass lediglich ein Bauteil als Muster vorliegt, müssen die Ergebnisse durch weitere Versuche bestätigt werden. Eine Verkippung durch den veränderten Schwerpunkt des Kerns kann nicht ausgeschlossen werden und muss bei der Bemessung von Hohlkernen grundsätzlich vertieft betrachtet werden. Allerdings handelt es sich hierbei um ein lösbares Problem, welches die Eignung des Verfahrens zur Hohlkernherstellung nicht beeinträchtigt.

15.8.3 Untersuchung der Porosität

Im Anschluss wurde das Fertigteil zur Untersuchung in vier Abschnitten aufgeteilt (vgl. Abbildung 15-48). Die Viertel wurden anschließend im CT untersucht. Zu überprüfen war hier, ob die Eiskerne zu einer veränderten Porengröße und Verteilung im Fertigteil führen würden. Aufgrund des prozesstechnisch eingebrachten Wassers galt es eine erhöhte Gasporosität auszuschließen.

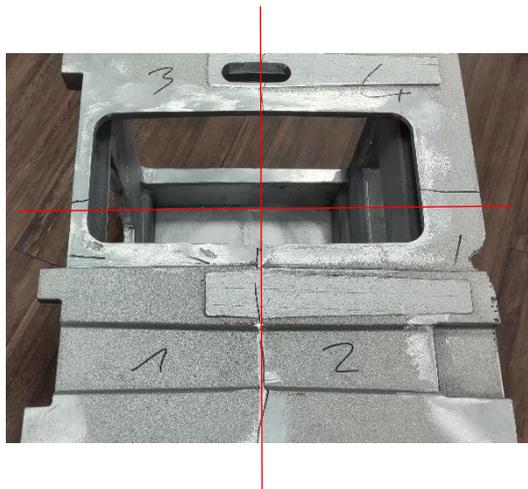


Abbildung 15-48: Viertelung für CT

Auswertung der CT-Bilder

Erkennbar ist, dass in beiden Bauteilen eine gleichmäßige Porenverteilung vorliegt. Weder im Eiskern-, noch im Standardverfahren hergestellten Bauteil lassen sich besonders randnahe Poren hervorheben, die auf besondere Einflüsse durch die Feuchtigkeit des Eiskerns hindeuten würden. Auch die Größe der Poren ist in beiden Bauteilen vergleichbar. Das Gleichmäßige Porenbild ohne Randschichtkonzentration lässt auf füllungsbedingte Porenbildung schließen. Die Porenverteilung ist auch in allen vier Teilen und in jeder Höhe der Gießlage vergleichbar. Abbildung 15-49 zeigt Ausschnitte aus den Vierteln zwei und vier vgl. Abbildung 15-48.

Die Auswertung der Poren ergab folgende Kennwerte. Die Flächenporosität des Eiskernanteils liegt im Bereich von 1,14 % bis 6,04 %. Die Flächenporosität des konventionellen Teils liegt im Bereich von 1,09 % bis 2,79 %. Es gibt keinen Unterschied zwischen der Gesamtdicke des Bauteils und der Region of Interest in der Nähe des Kerns. Die erhöhte Porosität des Eiskernanteils kann bei diesem Vergleich jedoch nicht eindeutig auf den Eiskern zurückgeführt werden, da die Qualität des Referenz-CTs vergleichsweise schlecht war und die erhöhte Porenzahl im Bauteilzentrum liegt, was gegen zusätzliche Poren durch Feuchtigkeit im Formstoff spricht. Das Verhältnis der mittleren Porengröße in den gleichen Bauteilbereichen

von $\frac{\text{Eiskern}}{\text{Normalteil}}$ liegt zwischen 0,82 und 3,63. Das Medianverhältnis liegt zwischen 0,8 und 3. Es wird angenommen, dass die Eiskerne keinen bis geringen Einfluss auf die Qualität des Gussteils haben. Auch diese Annahme muss aufgrund der geringen Probenmenge von einem Stück mit weiteren Versuchsabgüssen bestätigt werden. Probenschliffe, die eine genauere Beurteilung der Porenverteilung erlauben, sollen im weiteren Verlauf folgen. Zum jetzigen Zeitpunkt liegen jedoch noch keine Ergebnisse vor.

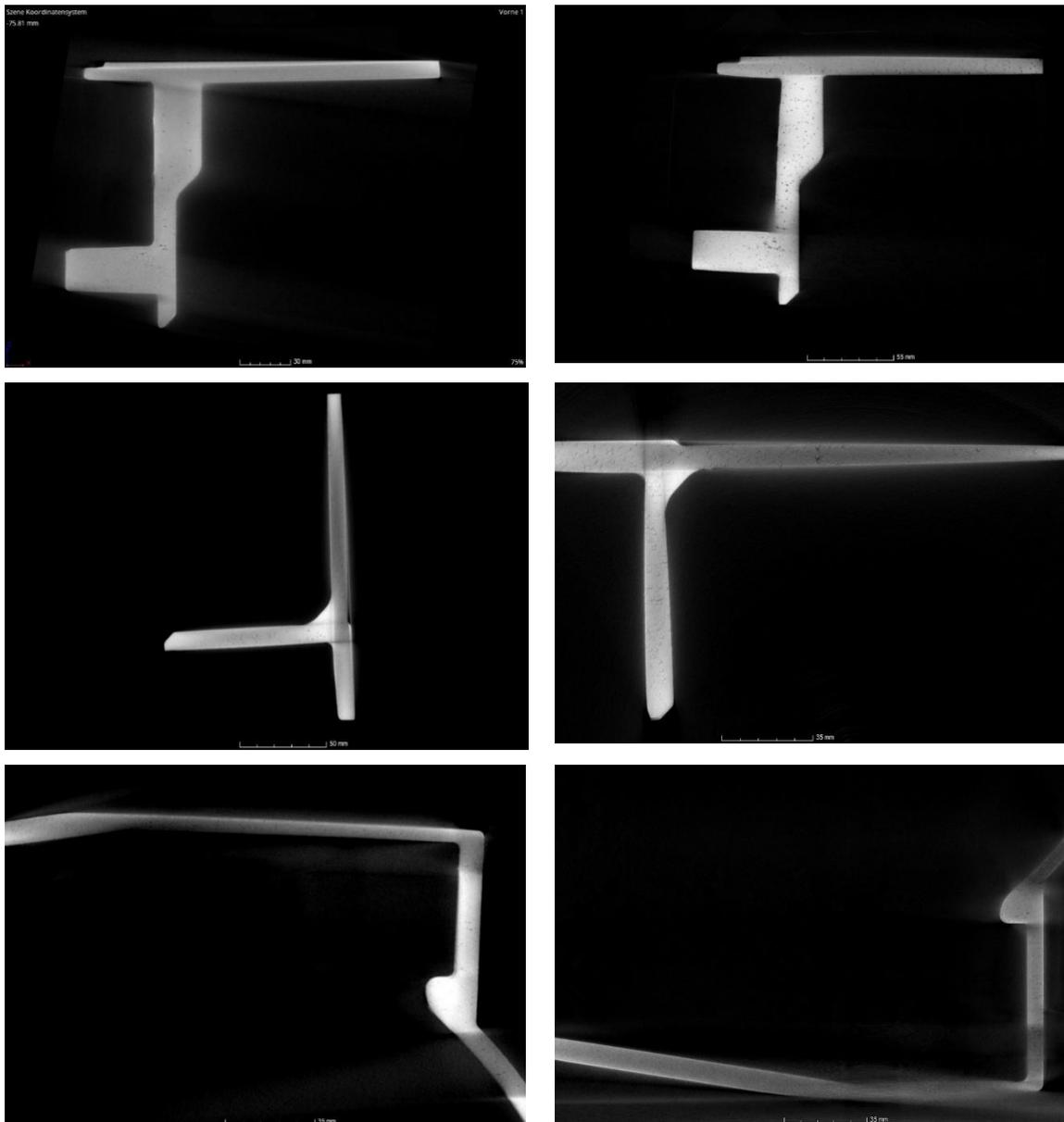


Abbildung 15-49: a) herkömmliches Bauteil

b) Testbauteil mit Eiskern

15.9 Fazit zur Herstellung von Hohlkernen mittels Eiskernen

Die Herstellung von Hohlkernen unter Verwendung von Eiskernen aus Sand-Wasser-Gemischen ist durchführbar. Der Wassereintrag aus den in Trockeneis gefrorenen Eiskernen ist vernachlässigbar und hat nach heutigem Kenntnisstand keinen Einfluss auf das Verfahren. Die Sandkerne sind fest genug, um dem Druck der Schmelze zu widerstehen. Das Verfahren muss an die neuen Bedingungen angepasst werden, verspricht dann aber gute Ergebnisse. Eine weitere Umsetzung in die Serie wird angestrebt.

16 Einsatz von 3D gedruckten Hohlformern aus thermoplastischen Elastomeren (TPE)

Ziel des Versuchs ist es, die Herstellung von schwer entformbaren Sandkernen zu optimieren. Wo starre Hohlformer aufgrund von Hinterschnitt- oder Verkantproblemen an ihre Grenzen stoßen, erhofft man sich durch die elastischen Eigenschaften von TPE-Hohlformern eine verbesserte Entformbarkeit. Darüber hinaus wird das Ziel verfolgt, durch den Einsatz von elastischen Hohlformern ohne Entformungsschrägen oder mit Hinterschnittgeometrie das Formmaterial zu minimieren.

16.1 Herstellung der Hohlformer

Zu Beginn müssen die Hohlformer vorbereitet werden. Gedruckt werden die Überzüge aus TPE85 der Firma eSUN auf einem C2 IDEX Extended Drucker der Firma CR3D. Für das Infill wird eine gyroidale Struktur verwendet.



Abbildung 16-1: Filament und 3D Drucker

Der Holzklötz, der die Basis des Hohlformers bildet, wird mit der Hülle aus TPE überzogen. Der Holzklötz soll die Beschränkung der Verformbarkeit und spätere die Montage im Kernkasten gewährleisten. Die TPE-Hülle fungiert als kompressible Schicht für bessere Entformbarkeit der Hohlformer aus dem Formsand.



Abbildung 16-2: Hohlformer aus TPE (Von links nach rechts Variante 1 - 3)

16.2 Versuchsdurchführung

Die TPE-Einlagen werden mit dem Trennmittel Demotex A besprüht. Anschließend wird der Hohlformer in den Formkasten eingelegt und mit Sand gefüllt. Der Sand wird von Hand verdichtet und die Form abgezogen. Der Sand wird mit CO₂ begast, bis der Hohlformer in einem festen Sandbett eingeschlossen und die Formstoffmasse ausgehärtet ist. Danach wird der Hohlformer entnommen. Die Struktur wird auf Entformbarkeit und Neigung zur Adhäsionsbildung geprüft. Im Versuch werden drei verschiedene Lösungsansätze betrachtet. Ein vollständig kompressibler Quader mit Entformungsschrägen (Variante 1), ein Quader ohne Entformungsschrägen mit einer kompressiblen Randzone aus TPE, die fest mit dem Kernwerkzeug verbunden ist (Variante 2) und eine kompressible Randzone, die nicht mit dem Kernwerkzeug verbunden ist und einzeln entnommen werden kann (Variante 3). (vgl. Abbildung 16-2).



Abbildung 16-3: TPE Einleger in Formsand eingeformt

16.3 Ergebnisse

Es wurde gezeigt, dass alle drei Varianten funktionieren. Sowohl der Quader mit, als auch beide Quader ohne Formschrägen konnten aus dem ausgehärteten Sand entnommen werden. Durch vorsichtiges hin und her bewegen war das Auslösen ohne Oberflächenabrieb erreichbar.



Abbildung 16-4: Sandform nach Auslösen Variante 1 (links) und Variante 2 (rechts)

Es gibt bei keiner Variante Anhaftungen am Kunststoff. Die Hohlräume im Sand bilden sogar die Druckschichten der TPE-Hüllen ab. Auch die Variante mit der abnehmbaren TPE-Hülle funktioniert wie geplant. Der Überzug bleibt in der Form zurück und kann anschließend durch Zusammendrücken entfernt werden (vgl. Abbildung 16-5).



Abbildung 16-5: Entnahme der Variante 3

Im nächsten Schritt soll das nachgewiesene Verhalten auch an geschossenen Kernen validiert werden. Es bestehen bereits Pläne für gedruckte TPE Hohlformern mit hinterschnittener Geometrie. Die Hinterschnitte können dabei wie in Variante 3 nachträglich aus der Sandform entnommen werden oder auch direkt auf dem Holzklotz montiert werden, sollte es sich als möglich erweisen, sie direkt aus dem Sand zu ziehen wie in Variante 2.

Der Wegfall von Entformungsschrägen hat eine Einsparung an Formstoff zur Folge, welcher die weitere Untersuchung des Sachverhaltes rechtfertigt.

16.4 Geometrievariationen

Im Anschluss an die Vorversuche wurden im weiteren Verlauf Hohlformern mit Hinterschnitten aus TPE Material getestet. Die Kompressibilität des Materials ermöglicht auch solche erweiterte Geometrien aus dem Formsand entnehmen zu können. Zu prüfen ist, im Anschluss an das Projekt noch bis zu welchem Ausmaß Hinterschnitte umsetzbar sind.

Die folgenden zwei Geometrien konnten bereits erfolgreich getestet werden. Zum Ersten ein Hohlformer der sich über zwei Keilstufen vom senkrechten Querschnitt aus erweitert (Variante A) und ein Hohlformer der sich von der Grundplatte über eine Keilstufe auf einen Größeren Querschnitt ohne Entformungsschrägen erweitert (Variante B) (vgl. Abbildung 16-6 und Abbildung 16-7).

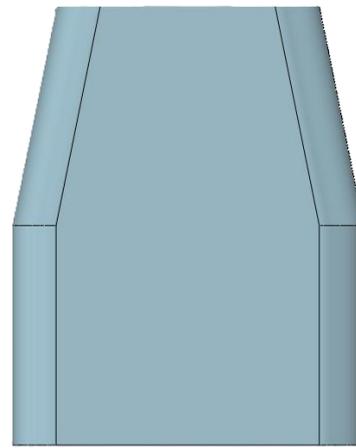
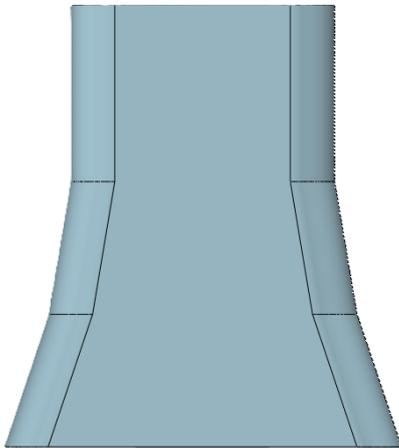
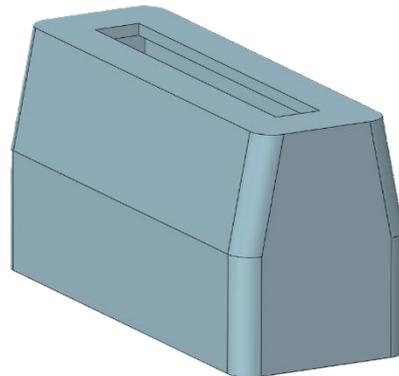
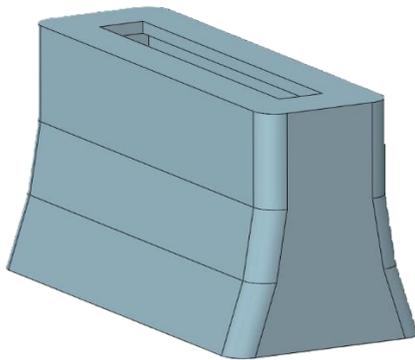


Abbildung 16-6: Variante A

Abbildung 16-7: Variante B

Die gezeigten Geometrien haben folgende Verhältnisse zur bisher verwendeten Standard Geometrie mit Formschräge und zeigen noch einmal deutliche Verbesserungspotentiale zur Ersparnis der eingesetzten Formstoffe.

Tabelle 16-1: Volumenverhältnisse der Hohlformervarianten

Variante	Ohne Formschrägen	Variante A	Variante B
$\frac{\text{Volumen Variante}}{\text{Volumen Standard}}$	1,1275	1,2745	1,4216



17 Reduzierung des CO₂-Fußabdruckes durch Hohlformler

Der CO₂-Fußabdruck der Fertigung von Sandkernen und Formen für den Handformguss setzt sich zum überwiegenden Teil aus den Einsatzstoffen zusammen. Die Kernfertigung wird durch ein Resol-CO₂ Verfahren durchgeführt. Die CO₂-Äquivalente sind in Tabelle 17-1 dargestellt.

Tabelle 17-1: CO₂ Äquivalente der Einsatzstoffe

Einsatzstoff	CO ₂ -Äquivalent [kg CO ₂ /kg]	Quelle	Anteil an einem kg Formstoff	CO ₂ -Äquivalent je kg Formstoff
Quarzsand	0,0199	EEW 2022	0,98	0,019303
Resol	0,77	EEW 2022	0,02	0,01925

Beispielhaft wurde die Formstoffeinsparung für das im Eiskernverfahren hergestellte Serienbauteil berechnet und die CO₂- und Ressourceneinsparung ermittelt. Das Serienbauteil hat einen Kern mit ca. 65 kg Formstoff. Durch den Einsatz des Eiskerns konnte das Kerngewicht um 35 kg reduziert werden. Dies führt bei einem Jahresbedarf von ca. 500 Stück zu den in Tabelle 17-2 dargestellten Einsparungen.

Tabelle 17-2: CO₂ Ersparnis

Einsatzstoff	CO ₂ -Äquivalent je kg Formstoff	CO ₂ -Ersparnis [kg]	Ressourcen Ersparnis [kg]
Quarzsand	0,019303	333,97	17250
Resol	0,01925	263,73	345
CO ₂ Gas*	0,0465	795,95	
Summe		1.393,65	

*errechnet aus dem Jahresverbrauch CO₂-Gas durch den Verbrauchten Kernsand

Durch die Verwendung der verschiedenen im Antrag erarbeiteten Ansätze für Hohlformer ist voraussichtlich eine Einsparung von ca. 20 % des Formstoffes sowohl in der Kernherstellung als auch der Herstellung von Formen im Handformguss möglich. Für eine Jahresmenge bedeutet dies eine Einsparung von insgesamt 38.231 kg CO₂.

Tabelle 17-3: CO₂ Ersparnis Jahresbedarf bei 20 % Formstoffersparnis

Einsatzstoff	CO ₂ -Ersparnis Kernherstellung [kg]	CO ₂ -Ersparnis Formherstellung Handguss[kg]
Quarzsand	3.257,42	12.353,92
Bindemittel	2.572,26	12.320,00
CO₂ Gas	7.763,39	
Summe	13.593,08	24.673,92



18 Zusammenfassung

Die Notwendigkeit von Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit in der produzierenden Industrie ist von zentraler Bedeutung für die Zukunft Europas. Angesichts der begrenzten Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen und der wachsenden Umweltbelastung müssen Unternehmen Wege finden, ihre Produktionsprozesse effizienter und umweltfreundlicher zu gestalten. Ressourceneffizienz bedeutet, den Material- und Energieeinsatz zu minimieren, Abfall zu reduzieren und Produkte so zu gestalten, dass sie länger halten und leichter recycelt werden können.

Die EU hat mehrere Richtlinien und Verordnungen erlassen, um die Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit in der Industrie zu verbessern. Ein zentrales Instrument ist der "Europäische Green Deal", der darauf abzielt, die EU bis 2050 klimaneutral zu machen. Teil dieses Deals ist der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, der Maßnahmen zur Reduzierung von Abfällen und zur Förderung des Recyclings vorsieht.

Durch die Umsetzung dieser europäischen Gesetze soll nicht nur die Umwelt geschont, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie gestärkt werden. Unternehmen, die ressourceneffiziente und nachhaltige Praktiken übernehmen, können ihre Kosten senken, ihre Marktposition verbessern und sich auf zukünftige regulatorische Anforderungen vorbereiten. Die Förderung von Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit ist daher nicht nur ökologisch notwendig, sondern auch ökonomisch vorteilhaft.

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts zur Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Hohlkernen basierend auf Kernschießtechnologie sowie Handabformung zeigt vielversprechende Ergebnisse und Fortschritte in der Gießereitechnologie:

1. ****Umweltfreundlichere Fertigungstechnologien****: Das Projekt adressiert den Bedarf nach umweltfreundlicheren Herstellungsverfahren in der Gießereiindustrie, insbesondere durch den Einsatz anorganischer Bindemittel und die Entwicklung ressourcenschonender Prozesse.
2. ****Alternative Ansätze zur Kernherstellung****: Die Untersuchung verschiedener Ansätze zur Herstellung von Hohlkernen mittels Folienkernen, Eiskernen und anderen Techniken zeigt einen innovativen und vielseitigen Ansatz zur Verbesserung der Gießereiproduktion.
3. ****Reduzierung des Energiebedarfs****: Durch die Herstellung von Hohlkernen wird eine Senkung des Energiebedarfs im Vergleich zur herkömmlichen Produktion von Vollkernen angestrebt, was potenziell zu erheblichen Energieeinsparungen führen kann.



4. ****Besseres Entkernverhalten****: Die Ergebnisse zeigen, dass Hohlkerne ein verbessertes Entkernverhalten aufweisen, was zu effizienteren Entkernungsprozessen führt und die Produktivität steigert.
5. ****Materialeffizienz****: Trotz des geringeren Materialverbrauchs bei der Herstellung von Hohlkernen im Vergleich zu Vollkernen erreichen die Hohlkernproben vergleichbare Festigkeitswerte, was auf eine verbesserte Materialeffizienz hinweist.
6. ****Anwendungspotenzial****: Die Entwicklung eines Doppelrohrkerns als Demonstrator zeigt das Anwendungspotenzial der entwickelten Methodik und Technologie in der Praxis, was die Relevanz und den Nutzen des Projekts für die Gießereiindustrie unterstreicht.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass eine Einsparung von bis zu 20% des Formstoffes sowohl in der Kernherstellung als auch in der Herstellung von Formen im Handformguss umsetzbar ist. Die daraus resultierende Reduktion der CO₂-Emission ist beträchtlich.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen das Potenzial von Hohlformern für den Sandguss, sowohl in Bezug auf die Effizienz der Produktion als auch auf die Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks, und legen nahe, dass weitere Untersuchungen und Entwicklungen in diesem Bereich erfolgversprechend sind.

Insgesamt liefert das Forschungsprojekt vielversprechende Ergebnisse, die das Potenzial haben, die Effizienz, Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit von Gießereiprozessen deutlich zu verbessern.