Untersuchung des Einflusses der Gießparameter auf die Porosität bei Aluminium-Vollformgussteilen

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Archil Barbakadze

geboren am 16. November 1972 in Třinec, Tschechoslowakei

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Tilch, Freiberg Prof. Dr.-Ing. habil. Jurgen Bast, Freiberg Dr.-Ing. Jens Wiesenmüller, Lienen

Tag der Verleihung: 10. Februar 2005

Inhaltsverzeichnis

1.	Vorbemerkung	1
1.1.	Einleitung	1
2.	Verfahrensbeschreibung	3
2.1.	Varianten des Vollformgießverfahrens	5
2.2.	Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile des Vollformgießverfahrens	8
2.2.1.	Vorteile des Verfahrens	8
2.2.2.	Nachteile des Verfahrens	10
2.3.	Modellwerkstoff	12
2.3.1.	Schaumstoffe für das Vollformgießen	12
2.3.2.	Herstellung der Schaumstoffmodelle	15
2.3.3.	Kleber	17
2.4.	Schlichten für das Vollformgießverfahren	17
2.5.	Einbetten des Modells und Verdichten des Formstoffes	18
3.	Technologische Einflussgrößen des Vollformgießens auf die Porosität	20
3.1.	Gusswerkstoffe für das Vollformgießverfahren	21
3.1.1.	Sauerstoffaffinität von Aluminiumlegierungen	22
3.1.2.	Wasserstofflöslichkeit von Aluminiumlegierungen	22
3.1.3.	Schmelzebehandlung von Aluminiumlegierungen	24
3.2.	Wasserstoffaufnahme im Gießprozess	25
3.3.	Gasdurchlässigkeit im System Schmelze-Schlichte-Quarzsand	26
3.3.1.	Einfluss der Schaumstoffmodelleigenschaften auf die Porosität	29
3.3.1.1.	Einfluss der Schaumstoffmodelldichte	30
3.3.1.2.	Einfluss der Schaumstoffmodellmontage	32
4.	Forschungsziele und Aufgaben	35
5.	Versuchsdurchführung	37
5.1.	Das Messsystem für die Formfüllung	39
5.2.	Die verwendete Legierung	40
5.3.	Vorversuche	41
6.	Versuchsbeschreibung	49
6.1.	Sandguss	49
6.2.	Kokillenguss	50
6.3.	Vollformguss	51

6.3.1.	Schaumstoffmodell	51
6.3.2.	Schlichten	54
6.3.3.	Einbetten	54
6.4.	Visuelle Gussteilprüfung	55
6.5.	Probenvorbereitung und Kennwertermittlung	56
6.5.1.	Dichtebestimmung	57
6.5.2.	Härte	58
7.	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	59
7.1.	Einfluss der untersuchten Variablen auf die Porosität	59
7.1.1.	Gießart	59
7.1.2.	Schlichte	64
7.1.3.	Unterdruck	67
7.1.4.	Schmelzebehandlung	69
7.2.	Visualisierung des Prozesses der Formfüllung beim Vollformgießen	72
7.2.1.	Vorgänge an der Grenzfläche Schaumstoffmodell - Schmelze	72
8.	Erstarrung und Gefügeausbildung	79
8.1.	Gefüge	79
8.2.	Mechanische Eigenschaften	81
8.2.1.	Zugfestigkeit und 0,2 % – Dehngrenze	81
8.2.2.	Bruchdehnung	81
8.2.3.	Härte	83
8.3.	Porosität	85
9.	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	90
Bilderverzeichnis		
Literaturverzeichnis		
A n l a g e n		

Danksagung

Zur Entstehung dieser Arbeit haben viele Persönlichkeiten direkt oder indirekt beigetragen, wofür ich mich bei allen bedanken möchte.

An erster Stelle gilt mein ganz besonderer Dank meinen Eltern, die mir immer Kraft gegeben haben, diese Arbeit zu Ende zu führen. Dieses Dankeschön möchte ich natürlich auch an meine Schwester richten.

Für die herzliche Aufnahme ins Institut danke ich allen damaligen Mitarbeitern, insbesondere dem ehemaligen Institutsdirektor, Herrn em. Prof. Dr.-Ing. habil. Flemming. Für die materielle Sicherstellung der Untersuchungen und für ihre fachliche Unterstützung danke ich den Herren Prof. Dr.-Ing. habil. Bast und em. Prof. Dr.-Ing. habil. Mai.

Mein Dank gilt im besonderen Maße meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tilch, der in großzügiger Weise die Einreichung und Verteidigung meiner Arbeit ermöglichte.

Den Gutachtern bin ich für ihre Hinweise und fachlichen Rat bei der Abfassung der Arbeit zu Dank verpflichtet.

Für die finanzielle Unterstützung danke ich der Stiftung "Industrieforschung" und Herrn Dr. Lerch für eine unkomplizierte Zusammenarbeit.

Den Mitarbeitern des Versuchsfelds vom GIESSEREI-INSTITUT danke ich für die große Hilfe, die ich bei der Durchführung meiner Experimente erfuhr und für die vorzügliche Freundschaft, die ich nie vergessen werde.

Ich danke allen anderen, die ich hier nicht persönlich erwähnt habe, die aber keine geringe Rolle bei der Erschaffung dieser Arbeit gespielt haben.

1. Vorbemerkung

Die Erhöhung der Sauberkeit von Legierungen durch Entfernung metallurgischer Defekte erweist sich als eine nicht unbedeutende Reserve für die Eigenschaftsverbesserung von Gussteilen.

Gießereibetriebe sind zur Wahrung ihrer Marktposition gezwungen, ihre Produkte den stetig steigenden Ansprüchen hinsichtlich Qualität und Funktionalität anzupassen. Unter Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Zwänge überprüfen Gießereien innovative Fertigungsalternativen auf ihre Zweckmäßigkeit. Vor diesem Hintergrund rückt die Vollformgießtechnik zunehmend in das Blickfeld.

Das Vollformgießverfahren, im angelsächsischen Sprachgebrauch unter "Lost foam" – Verfahren bekannt, hat industrielle Bedeutung für spezielle Sortimente und Stückzahlen erlangt. Wie bei jedem Verfahren, so ist auch beim Lost foam – Prozess die erzeugte Gussqualität von der Einhaltung bestimmter gießtechnologischer Parameter abhängig. Den Einfluss der wichtigsten technologischen Prozessgrößen beim Vollformgießen auf die Gussteilqualität einer Aluminiumlegierung zu untersuchen, war Anliegen dieser Arbeit.

1.1. Einleitung

Das Vollformgießen wird nach DIN 8580 Fertigungsverfahren, dem Gießen mit verlorenen Formen zugeteilt (**Bild 1**). Wie beim Feinguss wird auch bei diesem Verfahren mit verlorenen Modellen gearbeitet [1].

Die Vollformgießtechnik bietet sowohl den klein- und mittelständischen Gießereibetrieben als auch den Gießereien großer Konzerne eine interessante Variante zur Herstellung komplexer Gussteile.

Die nach dem Vollformgießverfahren hergestellten Seriengussteile müssen hinsichtlich ihrer Maßhaltigkeit und Oberflächengüte die gleichen Anforderungen erfüllen, wie nach herkömmlichen Verfahren gefertigte Teile. Sie müssen frei sein von Lunkern, Porosität und Einschlüssen. Nach einer spanenden Bearbeitung muss die Oberfläche der Gussteile sauber und frei von Fehlern sein.



Bild 1: Gießverfahren nach DIN 8580 [2]

Grundsätzlich ist das Vollformgießverfahren für alle Gusswerkstoffe geeignet und wird industriell angewendet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde jedoch ausschließlich die Legierung G-AlSi6Cu4 betrachtet.

2. Verfahrensbeschreibung

Erste Hinweise auf das Vollformgießverfahren datieren aus den 50er Jahren. H.F. Shroyer erhielt 1958 ein Patent auf die Verwendung von Polystyrol-Schaumstoff als Modellwerkstoff [3]. Als Formstoff wurde anfangs allerdings gebundener Formsand verwendet.

Das Interesse an diesem Verfahren wuchs besonders in der Automobilindustrie für die Herstellung großer Einzelteile. Die Weiterentwicklung dieses Verfahrens führte zu Patenten von H. Nellen 1960 sowie T.R. Smith 1964, die bereits ungebundenen Formsand verwendeten. [4], [5]. Aufbauend auf der Verfahrenstechnik nach [3] hat A. Wittmoser gemeinsam mit der Firma Grünzweig & Hartmann Anfang der 60er Jahre den "Lost Foam Prozess" in Deutschland zur industriellen Anwendung weiter entwickelt. Entscheidender Vorteil war die Verwendung von ungebundenem Quarzsand als Formstoff für das Einbetten der Schaumstoffmodelle.

Für die Entwicklung verschiedener Varianten des Vollformgießens wurden weitere Patente (R. Hofmann, "Magnetformverfahren" 1966 sowie E.M. Krzyzanowski, "Niederdruck-Vollformgießverfahren" 1968) erteilt [6], [7], [8].

Das Vollformgießverfahren besteht in der Verwendung geschäumter Polystyrolmodelle, die sowohl einzeln oder auch bei komplexer Gestalt zusammengefügt (geklebt) werden.

Diese Modelle werden mit dem ebenfalls aus Polystyrol bestehenden Anschnittsystem mit einer Schlichte überzogen und nach der Trocknung des Überzugs in einem speziellen Formkasten in Quarzsand eingebettet (**Bild 2**). Der Abguss kann sowohl im Schwerkraftguss fallend oder steigend, als auch nach dem Niederdruck-Gießverfahren erfolgen.

Nach der Abkühlung wird der Formkasten entleert und das Gussteil in den üblichen gießereispezifischen Verfahrensschritten versandfertig gemacht.



Bild 2: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses [9]

"Im Gegensatz zu anderen Gießverfahren spielen beim Vollformgießverfahren während der Formfüllung nicht nur überwiegend gießhydraulische Probleme eine Rolle. Der Formfüllvorgang wird durch die thermische Zersetzung des Modells überlagert. Bei Anwendung des Vollformgießverfahrens sollte demzufolge von der Vergasungscharakteristik des Schaumstoffmodells ausgegangen werden. Es ist also notwendig, dem Modell genau so viel Wärme zur Verfügung zu stellen, wie es für die optimale Vergasung benötigt. Daraus folgt, dass die Schmelze die Form so füllen muss, dass ein optimales Wärmeangebot zur Verfügung steht. Um diese Bedingung zu erfüllen, muss die Metallsteiggeschwindigkeit in Abhängigkeit von modellbestimmenden Eigenschaften gesteuert werden. Dabei sollte die angestrebte Metallsteiggeschwindigkeit zwei Anforderungen genügen" [10]: Das Metall darf nicht so schnell in die Form steigen, dass Teile des Modellwerkstoffes (weder in fester noch in flüssiger noch in gasförmiger Phase) in die Schmelze eingeschlossen werden.

Das Metall darf nicht so langsam in die Form steigen, dass das Modell vor der Schmelze zu schnell vergast, sich dadurch ein größerer Spalt zwischen Schmelze und fester Phase des Modellwerkstoffes bildet, der die Ursache für einen Formkollaps sein kann.

Zwischen diesen beiden Extremen ist ein Mittelweg zu finden. Beim Schwerkraftgießen wird sich eine Geschwindigkeit einstellen, die für die jeweilige Schmelze durch die Geometrie des Gießsystems vorgegeben ist. Das Gießsystem muss solange geändert werden, bis ein Gussstück der gewünschten Qualität entstanden ist.

Soll das Gießsystem nicht geändert werden, drängt sich eine Lösung, die schon seit längerer Zeit beim Niederdruck-Kokillengießen genutzt wird, förmlich auf: Die Schmelze steigt durch Anlegen eines Überdruckes auf die Schmelze im Tiegel. Beim Niederdruck-Vollformgießen kann so die Metallsteiggeschwindigkeit den Modellvergasungsparametern angepasst werden. Die Schmelze steigt durch ein Steigrohr in den Formhohlraum, der durch die Modellvergasung entsteht [3], [10].

2.1. Varianten des Vollformgießverfahrens

Bei der Suche zur Verbesserung der Qualität der mit dem Vollformgießverfahren gefertigten Gussteile wurden stetig neue Varianten entwickelt, die unter eigenen Namen, wie z. B. als Castyral, Replicast CS, Polyform, Gamodar, Magnetform-, Unterdruck- und Niederdruck-Vollformgießen bekannt geworden sind.

Einige Untersuchungsreihen haben gezeigt, dass erhöhte Modelldichte, gute Modellverschweißung sowie feinkörniger Schaumstoffmaterialtyp, also Faktoren, die der Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit dienen, sich gleichzeitig negativ auf die Porosität und Festigkeit der hergestellten Aluminium-Gussstücke auswirken. Experimentelle Ergebnisse haben gezeigt, dass die mechanischen Werte der Gussteile des herkömmlichen Vollformgießens niedriger als diejenigen des Schwerkraft- und Niederdruck-Kokillengusses sind. Die Ursachen dafür beruhen auf der verschiedenartigen Gefügefeinheit und Porosität der Gussteile, hervorgerufen durch unterschiedliche Erstarrungsgeschwindigkeit der einzelnen Verfahren.

Selbstverständlich und ideal wäre, die Erstarrungsgeschwindigkeit in allen Bereichen des Gussstückes ausreichend zu erhöhen, um überall die Gefügefeinheit und die thermischen Gradienten des Kokillengießens zu erreichen. Dieses scheint aber gegenwärtig noch nicht realisierbar. Die Anwendung von Formstoffen mit höherer Wärmeentzugsgeschwindigkeit brachte zwar eine geringe Erhöhung der Dehnungswerte aber keine wesentliche Verbesserung der Dichtheit.

Das durch SCRATA (GB) entwickelte Replicast CS (Ceramic Shell) -Verfahren ähnelt dem Wachsausschmelzverfahren. Das Modell wird mit einer Keramikmasse durch Tauchen in mehreren Schichten umhüllt und durch Brennen weiterbehandelt, um die Keramikschale zu verfestigen und gleichzeitig das Schaumstoffmodell zu vergasen. Das Verfahren ist durch hohe Prozesskosten und niedrige Produktivität gekennzeichnet [13], [14].

Das Polyform-Verfahren ist mit dem Replicast CS-Verfahren vergleichbar. Das Schaumstoffmodell wird mit keramischem Überzug mehrmals geschlichtet, luftgetrocknet und anschließend in ein fluidisiertes Sandbett eingeformt, das vorher von einem gasförmigen Medium auf 427 bis 593 °C erwärmt wurde. Innerhalb weniger Minuten zersetzt sich das Modell unter dem Einfluss der Temperatur. Damit entfällt das Porositätsproblem, die Energiekosten sinken und die Luftverschmutzung ist geringer [15].

Beim Gamodar-Prozess (Ukraine) wird eine optimale Formfüllgeschwindigkeit durch hohen Druck ermöglicht. Die Formfüllgeschwindigkeit kann durch die Druckeinwirkung und eine optimierte Prozesssteuerung verdoppelt oder sogar vervierfacht werden. Es wird angegeben, dass durch dieses Verfahren eine Senkung der Gießtemperatur je nach Legierung von 30 °K bis 70 °K erzielt werden kann. Die mechanischen Eigenschaften sollen sich um 30 % bis 50 % verbessern, das Ausbringen steigt von 75 % bis auf 95 %; eine Oberflächenqualität nahezu von Feinguss wird erreicht; es sollen sehr dünnwandige Gussstücke ohne Gussfehler produziert werden können [16]. Beim Magnetformverfahren wird rieselfähiges, magnetisierbares Formstoffgranulat durch Anlegen eines Magnetfelds während des Gießvorgangs und der anschließenden Erstarrung verfestigt. Dieses Verfahren hat keine industrielle Anwendung erlangt und wird nur durch Pilotanlagen für verschiedene Untersuchungen verwendet [7], [8].

Beim Unterdruck-Vollformgießverfahren wird der binderfreie Sand in einem im Formkasten erzeugten Unterdruck stabilisiert, der auch während des Gießens aufrecht erhalten bleibt.



Bild 3: Schematische Darstellung des Niederdruck-Vollformgießverfahrens [18]

Das Niederdruck-Vollformgießverfahren ermöglicht aufgrund der sehr guten Gasabführung das Einsetzen von Modellen mit höherer Dichte und Festigkeit. Der Formkasten mit dem Schaumstoffmodell wird auf eine angepasste Niederdruck-Gießanlage aufgesetzt (**Bild 3**). Die Steuerung der Formfüllung erfolgt gezielt über die Metallsteiggeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Modellvergasungskinetik [6], [18].

2.2. Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile des Vollformgießverfahrens

2.2.1. Vorteile des Verfahrens

Hauptmerkmal dieses technologischen Prozesses ist, dass das Modell vor dem Gießen nicht aus der Form entfernt werden muss. Diese Tatsache ermöglicht durch den damit verbundenen Wegfall einer Form- und damit Formkastenteilung eine erhöhte Genauigkeit der Gussstücke. Demzufolge verringern sich die Zugaben für die mechanische Bearbeitung. Die Gussteile können mit komplizierten Geometrien sogar ohne Verwendung von Kernen und Losteilen werden. Das Formen. Ausleeren, die Formstoffregenerierung hergestellt und Formstoffaufbereitung werden durch den binderfreien Formsand wesentlich vereinfacht. Der Arbeitsaufwand für das Trennen vom Anschnitt, das Entfernen von Grat, der durch Formteile und Kerne normalerweise entsteht, sinkt. Das Spektrum für die Automatisierung und Mechanisierung der Herstellung von Gussteilen wird breiter.

Durch ein hohes Maß an Flexibilität dieses Verfahrens bei der Darstellung komplizierter und aufwändiger Gussteile ist das Vollformgießen besonders für den Maschinenbau und die Automobilindustrie interessant.

Als weitere Vorteile dieses Verfahrens sind zu nennen [19], [20]:

Verfahrensbedingt:

- Entfall einer aufwendigen Formstoffregenerierung und Formstoffaufbereitung
- Geringer Formkastenverschleiß durch einteilige Formen
- Geringer Investitionsaufwand im Formenkreislauf und in der Putzerei
- Verringerter Putzaufwand durch leicht entfernbaren Formsand und Wegfall von Grat durch die nicht vorhandene Teilungsebene.
- Die Bearbeitungszugaben können durch endabmessungsnahes Gießen (Near Net Shape) (Bild 4, a).) und minimalen Modellschrägen, die max. 0,5° betragen, reduziert werden,
- Gusstoleranzen sind besser als beim Kokillen- oder Sandguss (Bild 4, b).)
- Oberflächenrauhigkeit ist besser als beim üblichen Schwerkraft-Sandguss.



Bild 4: a). "Near Net Shape" – Fähigkeit bei unterschiedlichen Gießverfahren [17]b). Gusstoleranzen bei unterschiedlichen Gießverfahren [17]

Umweltverträglichkeit:

Das Verfahren kann insgesamt im Vergleich mit anderen Gießverfahren als umweltschonend bezeichnet werden.

- Wegen des Formstoffs ohne Bindemittelzusatz entfällt eine aufwändige Regenerierung und Formstoffaufbereitung
- Durch den Wegfall der Kerne entsteht keine Kernbinderzersetzung mit ihren negativen Auswirkungen auf die Umwelt und die Gebrauchsfähigkeit des Umlaufsandes beim Gießen.
- Emissionen aus der Schaumstoffzersetzung fallen nur an drei Stellen (Gießen, Ausleeren und Regenerieren) konzentriert an.
- Diese entstandenen Emissionen können durch Biofilter gezielt am Ort der Entstehung abgesaugt und gereinigt werden.

Gussteildesign:

• Das Verfahren erlaubt weitgehende Freiheit bei der Konstruktion der Gussteile.

- Mehrere Einzelteile können in einem Stück gegossen werden, weil Schaumstoff-Modellteile zusammengeklebt und somit komplexe Bauteile gegossen werden können.
- Das Bestreben nach funktionsintegrierten Bauteilen wird gefördert.
- Dadurch werden ggf. Dichtungen und Verschraubungen in der Konstruktion überflüssig.

Wirtschaftlichkeit:

Das Innovationspotential des Vollformgießverfahrens wird von großen Automobilgießereien, wie auch von einer zunehmenden Anzahl von unabhängigen Gießereien in Nordamerika, Japan und Europa zur Sicherung ihrer Marktposition durch die Möglichkeit der Fertigung von funktionsintegrierten Serienbauteilen genutzt.

Das Fertigteil ist nach der Bearbeitung preisgünstiger als bei anderen Urformverfahren infolge geringerem Werkzeugverschleiß und kleinerer Investitionssumme für die Maschinen im Vergleich zum Sand-, Kokillen- oder Druckguss.

Die entscheidenden Vorteile des Vollformgießverfahrens liegen in der Fähigkeit des endabmessungsnahen Gießens und der freien Wahl des Gussstückdesigns. Die Kosten für die weitere Bearbeitung und Montage werden durch das Minimieren der Modellschrägen, ungeteilte Formen und den Wegfall von Bearbeitungszugaben deutlich verringert. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Gussteile in einem Stück zu gießen, die mit herkömmlichen Verfahren ansonsten nach dem Gießen montiert werden müssen [16 – 24].

2.2.2. Nachteile des Verfahrens

Wie jedes Verfahren, so hat auch das Vollformgießverfahren seine Nachteile.

Verfahrensbedingt:

- Hohe Anforderungen an die Schaumstoffmodellfertigung nach Art der Spritzgussmaschinen
- Infolge der Polystyrolzersetzung beim Gießen kann es zu Gussfehlern wie Glanzkohlenstoffeinschlüssen bei Gusseisenlegierungen, Aufkohlung bei Stahlguss, und Gasporosität bei Nichteisenmetall-Guss kommen.

- Bei falscher Vibrationstechnik beim Einbetten des Schaumstoffmodells in den Formsand ist eine Deformation des Modells möglich.
- Wanddicken unter 2,5 3 mm lassen sich nur schwer realisieren.

Umweltverträglichkeit

 Während der Zersetzung der Polystyrolschaumstoffmodelle entstehen Kohlenwasserstoff-Verbindungen, die unbedingt abgesaugt und gereinigt werden müssen.

Gussteildesign:

- Die reproduzierbare Genauigkeit ist derzeit noch ungenügend untersucht.
- Ein ungünstiges Verhältnis von Länge zu Breite des Gussteils bereitet Probleme.

Wirtschaftlichkeit:

- Werkzeugkosten für die Polystyrolschaumstoffmodelle sind vergleichbar mit denen beim Kokillen- und Druckguss.
- Werkzeugänderungen sind teuer.

Wenn die wirtschaftlichen Vorteile, die sich durch Einsparungen bei der weiteren Verarbeitung (Bearbeitung, funktionsintegrierte Konstruktion, Montage) ergeben, nicht berücksichtigt werden, ist ein Gussteil oftmals teurer als bei anderen Form- und Gießverfahren.

Durch die Entwicklung neuer Schaumstoff-Modellwerkstoffe und Vibrationstechniken sowie durch den Gebrauch von Schlichten können verfahrensbedingte Nachteile eingeschränkt werden.

Die beim Gießen aufgrund der Zersetzung des Schaumstoffmodells entstehenden Gießgase werden durch so genannte "Biofilter" geleitet, in denen sie abgebaut werden können.

Für die Erprobung zwecks künftigen Einsatzes können kostengünstige Formwerkzeuge ohne Anspruch an hohe Lebensdauer zur Herstellung der Schaumstoffmodelle gebaut werden. Der wirtschaftliche Vorteil vom Vollformgießverfahren liegt im Fertigteilpreis. Durch Einsparungen beim Putzen des Gussteils und der sich anschließenden Montage kann der Fertigteilpreis niedriger als bei anderen Gießverfahren liegen [24 - 32].

2.3. Modellwerkstoff

Trotz eines deutlichen Zuwachses des Kenntnisstandes wird der Modellfertigung, die im Grunde eine branchenfremde Verfahrenstechnik ist, zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Dabei kann nur eine ausreichende Kenntnis über die Herstellung der Schaumstoffmodelle eine Verbreitung des Vollformgießverfahrens begünstigen [9].

Die wesentlichen Schaumstoffmodelleigenschaften, die auf die Gussteilqualität Einfluss nehmen, sind [26], [39]:

- Maßhaltigkeit,
- Verschweißung,
- Verwendeter Materialtyp,
- Anteil flüchtiger Bestandteile,
- Oberflächenqualität und Rohdichte,
- Kleber.

2.3.1. Schaumstoffe für das Vollformgießen

Schaumstoffe gehören wegen ihres niedrigen Gewichts zur Gruppe der Leichtstoffe. Etwa 90 bis 98 % des Volumens nimmt das Füllgas ein. Der Rest des Volumenanteils von 2 bis 10 % entfällt auf die Festsubstanz.

Schaumstoffe bestehen aus vielen, kleinen, mit Gas gefüllten Zellen, die meist rundliche Form haben und von einander durch feine, dünnwandige Membranen (Zellwände) getrennt sind. Sie können natürlichen oder synthetischen Ursprung haben und zellulare oder kapillare Struktur aufweisen. Die Zellen sind entweder geschlossen, gemischt oder offen. Die Schaumstoffe mit Zelldurchmesser von < 0,3 mm gehören zu mikrozelligen, die mit 0,3 bis 2 mm - zu feinzelligen und die mit > 2 mm - zu grobzelligen Schaumstoffen [40].

Schaumstoffe, die sich aus selbstständigen Einzelblasen zusammensetzen, werden als echte Schaumstoffe bezeichnet. Die unechten Schaumstoffe entstehen durch Freisetzen eines Gases in einer Substanz [41], [42].

Beim Vollformgießverfahren werden hauptsächlich unechte, zellulare, sehr feinzellige Schaumstoffe eingesetzt [40].

Die Schaumstoffmodelle müssen folgenden Anforderungen gerecht werden:

physikalisch-mechanisch

- Bei einer minimalen Dichte muss der Schaumstoff ausreichende Festigkeit aufweisen, um bei der Herstellung, der Lagerung, dem Transport und dem Einformen die Modelle ihre Abmessungen und Geometrien beizubehalten.
- Die Schwindung muss bei allen Prozessschritten der Modellherstellung minimal, stabil und reproduzierbar sein.

technologisch

- Der Schaumstoff soll sich gut zu Platten, Blöcken und Profilerzeugnissen bei einem minimalen technologischen Aufwand und Energieverbrauch verarbeiten lassen,
- Er soll minimale Adhäsion zur Werkzeugoberfläche besitzen und nicht mit ihr physikalisch oder chemisch zusammenwirken,
- Der Schaumstoff soll sich leicht durch Schneiden, Hobeln, Schleifen usw. bearbeiten lassen,
- Er soll sich gut befeuchten lassen, sich aber nicht in den schnelltrocknenden Klebern und feuerfesten Überzügen lösen,
- Er soll minimale Hygroskopizität und maximale Stabilität bei Lagerung besitzen,
- die Umwandlungstemperaturen vom Schaumstoff (Schmelzpunkt, Verdampfungspunkt, Vergasung) müssen niedriger als die Gießtemperatur der zu vergießenden Legierung sein,
- Die erforderliche Wärmemenge für die Phasenumwandlung vom Schaumstoff soll minimal sein, um der Schmelze nicht zu viel Energie zu entziehen.
- Die Geschwindigkeiten von Phasenumwandlungen sollen so groß sein, dass die Schmelze vor der Erstarrung völlig die Form füllen kann und nur eine geringe Menge an Zersetzungsprodukten entsteht.

Bezeichnung	Chemische Zuordnung	Treibmittel	Raumgewicht	Anwendung
Styropor	Expandierbares Polystyrol (EPS)	Pentan	22 g/l	GG, GS, NE-Metalle
GEDEXCEL	Expandierbares Polystyrol (EPS)	Pentan	22 g/l	GG, GS, NE-Metalle
Styrolit CL 600 A	Expandierbares Polystyrol- Polymetacrylat Copolymerisat	Pentan	22 g/l	GGG, GS
LCB (Low Carbon Bead)	Expandierbares Polystyrol- Methylmetacrylat Copolymerisat	Pentan	21,5 g/l	GGG, GS
РММА	Expandierbares Polymetacrylat (EPMMA)	Iso. Hexan	21,5 g/l	GGG, GS

Bild 5: Schaumstoffmodellwerkstoffe [20]

In der Gießereipraxis wird eine Vielzahl von verschiedenen Schaumstoff-Modellwerkstoffen eingesetzt, die sich durch unterschiedliche chemische Zusammensetzung sowie durch das verwendete Treibmittel unterscheiden. Durch ihre spezifischen Eigenschaften beschränkt sich ihre Anwendung nur auf bestimmte Gusswerkstoffe, die im Vollformgießverfahren vergossen werden. Das **Bild 5** zeigt eine Übersicht in der Praxis verwendeter Modellwerkstoffe [20].

Modelle für das Vergießen von Aluminiumlegierungen werden aus dem thermoplastischen Kunststoff - Polystyrol gefertigt, der die folgende chemische Struktur aufweist:

$$- \operatorname{CH}_2 - \operatorname{CH} - \operatorname{CH}_2 - \operatorname{CH} - \operatorname{CH}_2 - \operatorname{CH} - \bigcup_{i=1}^{i} \bigcup_{i=1}^$$

Polystyrol entsteht durch Verbinden von Styren-Molekülen. Das Ergebnis sind Polystyren-Ketten von unterschiedlicher Länge, die zur Ausbildung einer minimalen molekularen Spannung, ähnlich wie ein entspanntes Gummiband zusammengerollt sind. Zu beachten ist, dass durch das Schäumen bei der Modellherstellung die Dichte auf etwa 0,015 bis 0,04 g/cm³ zurückgeht. Für geschäumte Gießereimodelle wird das Optimum von Dichte, Festigkeit und Oberflächengüte bei Dichtewerten um 0,02 g/cm³ und darunter erreicht. Für eine gleichmäßige Struktur der Modelle sollten schon im Ausgangsmaterial die Streuung der Dichte und der Korngröße möglichst gering sein [43].

Da beim Gießen der Modellwerkstoff thermisch zersetzt wird und dabei in kurzer Zeit eine relativ große Gasmenge freigesetzt wird, aber auch feste Reaktionsprodukte entstehen können, kommt dem Modellwerkstoff eine entscheidende Rolle bei der fehlerfreien Gussteilfertigung zu.

2.3.2. Herstellung der Schaumstoffmodelle

Für die Herstellung der Modelle aus dem vorgeschäumten Polystyrol auf entsprechenden Schäummaschinen werden besondere, sehr genau gearbeitete Schäumwerkzeuge mit 0,5° bis 1° Aushebeschräge verwendet, üblicherweise aus Aluminium mit etwa 8 bis 10 mm Wanddicke [38].

Die eingebrachten Polystyrolperlen erweichen in den Schäumformen unter Wärmeeinfluss wieder, füllen die Form ganz aus und müssen miteinander verschweißen. Es gibt drei unterschiedliche Verfahren zur Modellherstellung: das konventionelle Nasskammerverfahren mit Lüftungsschlitzen, Vakuumverfahren sowie das Trockenkammerverfahren ohne Lüftungsschlitze. Die Gestaltung der Schäumformen richtet sich nach dem vorgesehenen Verfahren für die Modellherstellung. Beispielhaft soll das Vakuumverfahren zur Beschreibung der Modellherstellung dienen.



Bild 6: EPS-Modellherstellung nach dem Vakuumverfahren [26]

In **Bild 6** werden die einzelnen Stufen der Modellherstellung veranschaulicht. Zur Wärmezuführung durchströmt im einfachsten Fall Dampf von 110 bis 120 °C die Schäumform. Unmittelbar nach dem letzten Ausdehnen und dem Verschweißen der Perlen wird das Modell zur Verfestigung in der Form auf etwa 50 °C mit Wasser abgekühlt. Dabei bevorzugt man für Gießereimodelle deren indirekte Kühlung, so dass mehrere ineinander geschachtelte Räume den eigentlichen Formhohlraum für das Modell umgeben. Je nach Arbeitsweise erreicht man unterschiedliche Ergebnisse der Zykluszeit, der Oberflächengüte und des Feuchtigkeitsgehalts sowie unterschiedlichen Energieverbrauch und unterschiedliche

Formbeanspruchung. Als grober Anhaltswert wird eine Zykluszeit von 1 min genannt [26], [29], [44].

Nach kurzer Zeit weist das Modell gegenüber den Abmessungen unmittelbar nach dem Auswerfen eine Schwindung von 0,4 bis 0,5 % auf.

Das Modell dehnt sich in der ersten Stunde nach seiner Herstellung um 0,2 bis 0,5 % aus. Dem schließt sich eine sehr langsam abklingende Schwindung an, die je nach dem gesamten Verfahrensablauf bis zu 0,8 % Maßabweichung gegenüber der Schäumform erreichen kann. Allgemein ausgedrückt hängt die Schwindung vom Gleichgewicht zwischen dem Gasgemisch in den einzelnen Schaumstoffperlen und der umgebenen Luft sowie der molekularen Entspannung ab. Modelle mit Hohlräumen und Hinterschneidungen müssen häufig in Teilen gefertigt und dann zusammengeklebt werden.

2.3.3. Kleber

Wahl und Aufbringen des Klebers sind mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Der Kleber muss zusätzlich die Verbundstellen sicher nach außen hin abdichten, damit später kein Sand eindringen kann, was zu Fehlern führen würde. Da der Kleber möglichst rückstandsfrei vergasen muss, soll die Kleberschicht möglichst nicht über 0,1 mm dick sein. Klebeflächen sind daher nicht zuletzt im Hinblick auf einfaches gleichmäßiges Aufbringen des Klebers hin anzuordnen. Häufig werden Schmelzkleber gewählt. Für gleichmäßiges, zuverlässiges und schnelles Kleben setzt man bei Serien häufig mechanische oder automatische Einrichtungen ein. Somit kann die Klebeeinrichtung beträchtlich kostspieliger als die Einrichtung zur Modellherstellung sein. Zur Verbindung der Modelle mit dem Gießsystem wird auch das Thermoschweißen angewendet [20].

2.4. Schlichten für das Vollformgießverfahren

Als dritter Verfahrensschritt im "Lost foam" - Prozess ist das Schlichten vorgesehen. Der Schlichteüberzug, mit dem das Modell vor dem Einbau in den Formkasten versehen wird, dient hauptsächlich der Steuerung des Vergasungsverlaufes des Modells während des Abgießens. Die wichtigste Aufgabe dafür ist die Gasdurchlässigkeit. Bei einer geringen Gasdurchlässigkeit der Schlichte übersteigt der Gasdruck schnell den metallostatischen Druck und die Schmelze kocht aus der Form heraus. Es entstehen Gaseinschlüsse und Kohlenstoffhäute im Gusstück. Wenn aber die Gasdurchlässigkeit zu hoch ist, kann der geringe Gasdruck nicht der einströmenden Schmelze entgegenwirken und es ergibt sich eine turbulente Formfüllung. Gleichzeitig bildet die Schlichte eine Schutzschicht zwischen dem Gießmetall unmittelbar nach der Zersetzung des Schaumstoffmodells und dem umgebenden losen Sand. Dadurch wird ein Eindringen (Penetration) des flüssigen Metalls zwischen die Sandkörner vermieden und eine hohe Oberflächengüte erreicht [45], [46].

Die Schaumstoffmodelle bzw. Modelltrauben werden mit einer oder mehreren Schichten des Schlichteüberzuges versehen und anschließend bei einer Temperatur unterhalb 50 °C getrocknet. Die typische Schlichte für ein verlorenes Polystyrolmodell enthält eine oder mehrere der folgenden Inhaltsstoffe [40], [47]:

- Feuerfeststoffe als Hauptbestandteile, z.B. Silikate, Quarzmehl und Schamotte für die Verhinderung der Penetration und Beeinflussung der Gussteiloberfläche,
- Trägermaterial, meistens Wasser,
- Bindemittel, z.B. Dextrine und verschiedene Polymerbinder für eine gute Fixierung auf dem Modell und die Bindung der feuerfesten Teilchen miteinander,
- Suspensionsmittel, z.B. Tonminerale für den gleichmäßigen Auftrag auf dem Modell,
- Biocide und Tenside in der Anwesenheit von Wasser.

2.5. Einbetten des Modells und Verdichten des Formstoffes

Ein Vorteil des Vollformgießverfahrens ist zweifelsohne der binderfreie Formstoff. Er kann nach dem Abguss immer wieder verwendet werden, ohne dass der Formsand nach jedem Durchlauf regeneriert werden muss.



Bild 7: Luftblase bei unsachgemäßer Vibration [48]

Das Schaumstoffmodell bzw. die Modelltraube wird in den Formkasten eingesetzt und vorsichtig, vorzugsweise mittels flexibler Schläuche, vom losen Quarzsand umspült. Es ist darauf zu achten, dass es aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen dem Modellwerkstoff und dem Quarzsand nicht zu einem "Aufschwimmen" des Modells kommt, was mit einer Verformung des Modells einhergehen würde. Noch während des Einfüllens des Formstoffes wird dieser durch Vibrieren verdichtet. Das Vibrieren des Formsandes muss das vollständige, schonende Umhüllen des Modells mit gleichmäßiger Dichte und das entsprechende Ausfüllen aller Hohlräume sicherstellen. Besondere Aufmerksamkeit ist auf die Vermeidung modellbedingter Hohlräume zu richten (**Bild 7**). Oftmals wird ein Vibrationstisch mit mehreren Vibratoren ausgerüstet, die nach verschiedenen Achsen ausgerichtet sind und mit Frequenzen von ca. 50 bis 100 Hz arbeiten [49], [50].

3. Technologische Einflussgrößen des Vollformgießens auf die Porosität

Zum besseren Verständnis der im Rahmen dieser Arbeit behandelten Problematik ist es notwendig, auf die bedeutendsten Faktoren einzugehen, die beim Vollformgießverfahren auf die Porosität der Gussteile Einfluss nehmen können.

Unter Porosität sind Ungänzen im Gussteil zu verstehen, die die Gebrauchsfähigkeit eines Bauteils einschränken oder sogar ausschließen. Es sind Hohlräume in der Größenordnung von wenigen Mikrometern bis in den Millimeterbereich, häufig mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen, nachweisbar jedoch durch eine Dichtemessung oder unter dem Mikroskop. Diese, durch ausgeschiedenen Wasserstoff verursachte Mikroporosität wird erst spät, während oder nach der mechanischen Bearbeitung oder nach einem Bruch festgestellt. Prinzipiell verschlechtert die Porosität die mechanischen Eigenschaften durch Verringerung des tragenden Querschnitts. Die Poren im Inneren eines Bauteils sind mögliche Ausgangspunkte von Rissen.

Werden Gase oder Luft oder feste Zersetzungsprodukte, die bei weiterer Hitzeeinwirkung Gase freisetzen, im Metall eingeschlossen, dann kommt es zur Bildung von Gasblasen, die sowohl vereinzelt als auch gehäuft auftreten können (Makroporosität).

Die Ursache für die Porosität im Sinne dieser Arbeit liegt im Einschluss von Gasen oder der Aufnahme und atomar gelöster Gasen durch die flüssige Schmelze, die bei der Erstarrung freigesetzt, aber als Bläschen im Gussteil verbleibend, die so genannte "Gasblasenporosität" d.h. Mikro- und Makroporosität hervorrufen.

Diese, durch Gas hervorgerufene Fehlererscheinung, darf nicht mit der oftmals zitierten Lunkerporosität verwechselt werden, da dieser völlig andere Bildungsmechanismen zugrunde liegen.

Das Vorhandensein von Gas in einer Schmelze resultiert aus der Löslichkeit der jeweiligen Metallschmelze für Gase, insbesondere Wasserstoff. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Gusswerkstoff, die Legierung G-AlSi6Cu4 ist eine Aluminium-Silizium-Legierung, die durch eine hohe Bereitschaft zur Gasaufnahme und Gaslöslichkeit gekennzeichnet ist.

3.1. Gusswerkstoffe für das Vollformgießverfahren

Nach dem Vollformgießverfahren können alle üblichen Gusslegierungen vergossen werden. Dabei haben Stahlguss- und Gusseisenlegierungen den Vorteil höheren Wärmeinhalts gegenüber Leichtmetallguss-Legierungen, was sich auf den Wärmehaushalt beim Zersetzungsprozess des Modellwerkstoffs günstig auswirkt. Während bei Eisengusslegierungen die Gießtemperatur über 1250 °C liegt, ist sie mit ca. 750 °C bei Aluminiumlegierungen vergleichsweise niedrig.

Dennoch lassen sich auch Bauteile aus Aluminiumlegierungen nach diesem Verfahren herstellen.

Al-Si-Legierungen gehören heute zu den meistverwendeten Leichtbaugusswerkstoffen. Sie zeichnen sich durch hervorragende gießtechnologische Verarbeitbarkeit aus und eignen sich mit einer Dichte von etwa 2,7 g/cm³ und guten mechanischen Kennwerten für Leichtbaukonstruktionen. Die leichte Zerspanbarkeit verringert den mechanischen Bearbeitungsaufwand gegenüber Stahlguss um 50 %. Aluminium-Silizium-Legierungen bieten vielseitige Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung. Bekannt sind ihre gute elektrische und Wärmeleitfähigkeit. Durch die mit ca. 750 °C relativ niedrige Verarbeitungstemperatur lassen sich Gussstücke aus Aluminium-Silizium-Legierungen nach hochproduktiven Verfahren, wie Kokillen- oder Druckguss herstellen [51].

Aus gleichem Grund ist auch eine wirtschaftliche Serienfertigung nach dem Niederdruck-Vollformgießverfahren möglich.

Der Siliziumgehalt dieser Legierungsgruppe liegt zwischen 5-20 %. Das charakteristische Merkmal dieser Legierungen besteht darin, dass sie aus der primären Phase, Aluminium oder Silizium, und aus einer eutektischen Mischung beider Elemente bestehen. Die mechanischen

Eigenschaften dieser Legierungsgruppe hängen in starkem Maße von der Ausbildungsform des Al-Si-Eutektikums ab. Der eutektische Punkt liegt bei 12,5 % Si und 577 °C [52].

3.1.1. Sauerstoffaffinität von Aluminiumlegierungen

Die hohe Reaktionsenthalpie der Reaktionen

 $2 \text{ Al} + 3/2 \text{ O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3$ (Bildungswärme 1697 KJ/mol bei 750 °C)

und

2 Al + 3 H₂O = Al₂O₃ + 3H₂ (Bildungswärme 1079 KJ/mol bei 750 °C)

weisen auf eine starke Sauerstoffaffinität des Aluminiums hin. Bereits bei Raumtemperatur ist eine Aluminiumlegierung in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre mit einer dünnen, aber dichten Oxidhaut überzogen, die das darunter befindliche Metall vor weiterer Oxidation schützt.

Bei den Schmelz- und Gießvorgängen dagegen ist die Oxidation unerwünscht. Neben den die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigenden Abbrandverlusten wird die Schmelze durch oxidische Schlieren dickflüssiger, und dadurch verschlechtern sich Fließ- und Formfüllungsvermögen. Im Gefüge verursachen die Oxideinschlüsse Fehlstellen, die zu niedrigen Festigkeits- und Dehnungswerten führen [53] und darüber hinaus in Form von Korundeinschlüssen die Bearbeitbarkeit stark beeinträchtigen.

Die allgegenwärtigen Quellen für die Aufnahme von Sauerstoff sind der Luftsauerstoff, mit Krätze behaftete Werkzeuge sowie die Oxidhaut auf dem Einsatzmaterial. Auch Kohlenwasserstoffe als Zersetzungsprodukte des Schaumstoffmodells beim Gießen müssen als Ursache genannt werden.

Die Schmelztechnologie ist also auf die Vermeidung einer Sauerstoffaufnahme auszurichten.

3.1.2. Wasserstofflöslichkeit von Aluminiumlegierungen

Eine weitere, neben der Sauerstoffaffinität für das Vollformgießen weit relevantere Eigenschaft des Aluminiums und seiner Legierungen ist die Löslichkeit für Gase, insbesondere für Wasserstoff. Dieser Wasserstoff ist im Aluminium atomar gelöst.



Bild 8: Wasserstofflöslichkeit in Aluminium [54]

Danach ist die Löslichkeit von Wasserstoff in Aluminium stark temperaturabhängig (Bild 8).

Während der Erstarrung scheidet sich der Wasserstoff entlang der Löslichkeitslinie, insbesondere durch den Löslichkeitssprung bei 660 ⁰C in Form von kleinen Bläschen, den Poren aus, die in massiver Form die Porosität verursachen. Nur bei sehr hohen Abkühlungsgeschwindigkeiten verbleibt der Wasserstoff ohne Qualitätseinbußen im Gussteil gelöst. Deshalb ist ein Wasserstoffgehalt über 0,1 cm³/100g nicht erwünscht.

Legierungselemente, wie Silizium, Zink und Kupfer, senken die Wasserstofflöslichkeit geringfügig, während Magnesium und Natrium sie erhöhen.

Der Gehalt an Wasserstoff resultiert insbesondere aus dem Wasserdampfgehalt der Luft, Feuchtigkeit aus dem Schmelztiegel, den Werkzeugen und Einsatzmaterialien sowie Wasser in jeglicher Vorkommensart. Selbst die Aluminiumstücke umgebende Oxidhaut stellt eine Feuchtigkeitsquelle dar [55]. Hohe Wasserstoffgehalte der Schmelze können durch die thermische Zersetzung von Kohlenwasserstoffen, wie Öle und Fette, aber auch durch Zersetzungsprodukte der Schaumstoffmodelle beim Vollformgießverfahren verursacht sein, die dann im Gussteil zu Gasporosität führen. Bei den Auswirkungen der Wasserstoffporosität auf die Qualität der Gusstücke stehen die Verschlechterung der Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften, der Oberflächengüte, der Druckdichtheit und des Korrosionsverhaltens im Vordergrund.

Es ist also augenscheinlich, dass hohe Schmelzetemperaturen und ein Angebot von Wasser in jeglicher Form zu einer intensiven Aufnahme von Wasserstoff in die Legierung führen. Alle Möglichkeiten, die während des Schmelzens von Aluminiumlegierungen zur Wasserstoffaufnahme führen können, sind daher durch eine vorgegebene Schmelztechnologie auszuschließen bzw. einzugrenzen.

3.1.3. Schmelzebehandlung von Aluminiumlegierungen

Zur Qualitätssicherung ist neben der strikten Einhaltung der Schmelztechnologie eine Schmelzebehandlung vor dem Abguss angebracht, um sowohl den physikalisch bedingten Gas- als auch den chemisch verursachten Oxidgehalt der Schmelze weiter abzusenken.

Die Aluminiumoxide haben eine ähnliche Dichte wie die Schmelze und schweben in ihr als Trübe oder Oxidhaut. Durch den geringen Dichteunterschied gelangen die Oxide ebenso wie die sich im Verlaufe der Erstarrung ausscheidenden Gasbläschen nicht von sich aus an die Schmelzbadoberfläche. Daher ist eine Reinigung der Schmelze notwendig.

Der Oxidgehalt wird unter anderem durch Bedecken der Schmelzbadoberfläche mit speziellen Salzen in körniger oder Tablettenform verringert. Dazu dienen vorwiegend Chloride und Fluoride wie Na₂SiF₆-, Na₃AlF₆-, NaCl- und KCl-haltige Salze.

Die Absenkung des Wasserstoffgehalts wird durch Abstehen, Evakuieren oder Spülen mit Inertgasen erreicht. Die Wirkung des Abstehens ist nicht groß. Die Vakuumbehandlung dagegen ist sehr effektiv, die Aufwendungen dafür sind aber hoch [56].

Bei der Spülgasbehandlung werden die reaktiven Gase durch ein Rohr mit einem Düsenkopf in die Schmelze eingeleitet. Um dies wirkungsvoller zu machen, wird das Rohr gegebenenfalls in eine rotierende Bewegung versetzt (Impeller-Behandlung). Die vom Rohr in die Schmelze einströmenden kleinen Gasblasen nehmen die Wasserstoffmoleküle mit, da der Partialdruck in den Gasbläschen für Wasserstoff null ist. Je kleiner die Gasblasen und je besser in der Schmelze verteilt, umso effektiver ist die Behandlung. Gleichzeitig erfolgt bei dieser Spülgasbehandlung auch eine Entfernung von Oxiden und anderen Verunreinigungen aus dem Schmelzbad [57], [58].

3.2. Wasserstoffaufnahme im Gießprozess

Wenn eine erfolgreich behandelte Aluminium-Silizium-Schmelze mit weitgehend abgesenktem Wasserstoffgehalt beim Gießen mit dem Schaumstoffmodell in Kontakt kommt, das durch die Schmelze verdrängt und ersetzt werden soll, dann entstehen als Zersetzungsprodukte des Polystyrols Kohlenwasserstoffe, die unter ungünstigen Bedingungen von der Schmelze aufgespalten und deren Wasserstoff gelöst werden. In solchem Fall kann die vorherige Schmelzebehandlung ein fehlerhaftes Gussteil nicht verhindern.

Es sind daher diejenigen Einflussgrößen auszuschließen, die vom Beginn des Gießvorgangs bis zum Abschluss der Gusskörperbildung eine Gasaufnahme fördern oder gar verursachen.

Betrachtet man den Hergang der Formfüllung beim Vollformgießverfahren im Vergleich zum herkömmlichen Gießprozess, so besteht vor allem folgender Unterschied: Beim Vollformgießverfahren wird der Formhohlraum erst während des Gießens durch die schrittweise Verdampfung des Schaumstoffmodells frei. Die dabei entstehenden Verdampfungsprodukte des Schaumstoffs müssen in kürzester Zeit abgeführt werden. In der Gießform entsteht - bedingt durch die Vergasung des Schaumstoffs und zusätzlich durch die thermische Expansion der Verdampfungsprodukte - ein Gegendruck, der die Formfüllung zumindest behindert. Die Abführung der Gießgase im erforderlichen Umfang wird erschwert, und ein gesteuerter Ablauf der Verdampfung des Schaumstoffmodells durch das nachfliessende Gießmetall ist vielfach nicht gegeben. Dadurch wird eine unerwünschte Verflüssigung des Polystyrols begünstigt, wobei vorwiegend in den in der Form oben liegenden Bereichen des Gussstücks Fehler durch "grafitische Rückstände" auftreten. Darüber hinaus können nicht abgeführte Gießgase bei ungünstigen Erstarrungsverhältnissen im Gussstück verbleiben und die Bildung von Mikroporosität und makroskopischen Gaseinschlüssen fördern.

Außerdem besteht bei turbulenter Formfüllung die Gefahr, dass die mechanische Stabilität des am Modell anliegenden keramischen Überzugs, der mit dem binderfreien Formstoff ohne festen Verbund ist, örtlich nicht ausreicht. Dadurch können sowohl Keramikteilchen als auch Formstoffpartikel in den Formhohlraum hineingespült werden und Gussfehler verursachen. Solche Gussfehler liegen entweder offen erkennbar an der Oberfläche der Gussteile vor oder werden bei der spanenden Bearbeitung sichtbar.

3.3. Gasdurchlässigkeit im System Schmelze-Schlichte-Quarzsand

Es ist offensichtlich, dass die Gasdurchlässigkeit im System Schmelze-Schlichte-Quarzsand eine entscheidende Rolle bei der Beherrschung der Gasporosität im Vollformgießverfahren spielt. Eine schnelle Abführung der gasförmigen Zersetzungsprodukte des Schaumstoffmodells ist Voraussetzung für die Minimierung der Gasaufnahme durch die Schmelze.



Bild 9: Schematische Darstellung der Modellzersetzung bei der Formfüllung

Durch die Zersetzung des Schaumstoffmodells beim Abgießen treten erhebliche Mengen an Gasen auf, die aus dem frei werdenden Formhohlraum abgeleitet werden müssen (**Bild 9**). Andererseits sorgt der sich zwischen einströmender Schmelze und dem Schaumstoffmodell einstellende Gasdruck für eine ruhigere Formfüllung und verhindert Turbulenzen [59].

Abhängig vom Abstand zur Metallfront liegt das Polystyrol fest, flüssig oder gasförmig vor. In dem Bereich zwischen Schaumstoff und der Schmelze bilden sich verschiedene Abbauphasen des Polystyrols aus. In der Wärmeübergangsphase ist das Polystyrol noch fest. Dem schließt sich eine Zone mit verflüssigtem Polystyrol an. Die Dampfphase besteht aus Polymerketten, Monomeren, Benzol und geringen Mengen an Toluol (**Bild 10** und **Bild 11**).

Die Dampfphase geht anschließend in die Gasphase über, die vor allem Methan und Wasserstoff enthält. Beim Kontakt des Methans mit der Schmelzoberfläche können sich Glanzkohlenstoff und Ruß bilden [60].

Die Gasdurchlässigkeit beim Vollformgießen kann durch folgende Maßnahmen verbessert werden:

- Die Gasdurchlässigkeit des Schlichteüberzuges wird erhöht,
- Der Korndurchmesser des ungebundenen Quarzsandes wird erhöht, um größere Abstände zwischen den Körnern zu erreichen,
- Eine Vakuum-Abzugsvorrichtung wird installiert, um entstehende Gase durch die Beschichtung und den Quarzsand abzuleiten

Schlichteüberzüge, die speziell für das Vollformgießverfahren hergestellt wurden, wirken als "Ventil" während des Abgießens. Es ist wünschenswert, dass die Gase durch die Schlichte hindurch diffundieren und in den ungebundenen Sand geleitet werden.



Bild 10: Zersetzungsprodukte eines Schaumstoffes unter Gleichgewichtsbedingungen [60]



Bild 11: Zersetzung des EPS-Modells (EPS – expandierbares Polystyrol) [61]

Einen maßgeblichen Einfluss auf das Entstehen von Porosität im Gussteil übt das Gieß- oder Anschnittsystem aus. Kennzeichen des Vollformgießprozesses ist eine beruhigte Formfüllung, die auf die "Bremswirkung" eines Schaumstoffmodells in der Form zurückzuführen ist. Durch die voranschreitende Aluminiumschmelzefront beim Gießvorgang wird der Schaumstoffkörper unter Freisetzung von zunächst vorwiegend flüssigen und in geringem Maß gasförmigen Pyrolyseprodukten zersetzt. Die freigesetzten Produkte werden durch die Schmelzefront aufgrund des metallostatischen Drucks beim Schwerkraftguss in den anliegenden Formstoffbereich abgeführt. Der Widerstand, der der Schmelze entgegenwirkt, steuert dabei die Formfüllung. Werden Pyrolyseprodukte nicht rechtzeitig und vollständig durch die Schlichteschicht absorbiert und in den Formstoff abgeführt, sind Porosität und Einschlüsse im Gussstück die Folge [62].

Um die Einschlüsse von Zersetzungsprodukten und die Ausbildung von Oxideinschlüssen zu vermeiden, muss das Anschnittsystem in Abhängigkeit der Geometrie so ausgelegt werden, dass es der Entstehung von zwei oder mehreren Metallfronten bei der Formfüllung entgegenwirkt.

In den zurückliegenden Jahren konnten einige wesentliche mit dem Vollformgießverfahren von Seriengussteilen verbundenen Probleme verbessert werden, wie z. B. Oberflächengüte der Schaumstoffmodelle, die Entwicklung geeigneter feuerfester Überzüge (keramische "Schlichten") und die Optimierung von rieselfähigen metallischen oder auch nichtmetallischen Formstoffen.

Dagegen bereitet die Gewährleistung einer rückstandsfreien Verdampfung der Schaumstoffmodelle aus Polystyrol durch die in die Vollform einströmende Schmelze noch Schwierigkeiten. Dadurch kann der Einsatz dieses technologisch und ökologisch vorteilhaften Verfahrens in ungünstigen Fällen in Frage gestellt werden.

3.3.1. Einfluss der Schaumstoffmodelleigenschaften auf die Porosität

Es ist zu erwarten, dass ein Modell, das wie beim Vollformgießprozess mit der Schmelze in Berührung kommt, Einfluss auf die Gussteileigenschaften nehmen wird. Diese Wahrscheinlichkeit muss im Interesse der Qualität verhindert werden. Die nachstehende Aufzählung stellt die möglichen Einflussgrößen des Schaumstoffmodells und ihre Auswirkungen auf die Gussteileigenschaft dar (**Bild 12**). Es sind insbesondere die Faktoren von Interesse, die sich auf die Mikro- und Makroporosität auswirken [63].



Bild 12: Zusammenhänge zwischen Schaumstoffmodelleigenschaften und Gussteilqualität [64]

3.3.1.1. Einfluss der Schaumstoffmodelldichte

Eine wesentliche Einflussgröße auf die Porosität der Gussstücke stellt die Dichte der Schaumstoffmodelle dar. Sie wird durch die Materialschüttdichte als Ergebnis des Vorschäumprozesses sowie durch den Formfülldruck als Prozesskenngröße des Fertigschäumens bestimmt. Beim Gießen beeinflusst die Dichte des Modells wesentlich die Zersetzungsgeschwindigkeit des Schaumstoffmodells und damit die Formfüllung durch die Metallschmelze. Mit zunehmender Modelldichte wird der vorrückenden Metallschmelze ein erhöhter Widerstand entgegengesetzt, der zu einer beruhigten und gerichteten Formfüllung führt. Die theoretische Modelldichte "0" entspricht dem Füllen eines leeren Formhohlraumes.

Höhere Formbeständigkeit während des Einbettens im Formkasten, glättere Gussteiloberflächen und weniger Beschädigungen sind die Folge einer hohen

Schaumstoffdichte. Die Vorzüge der geringen Dichte dagegen sind Verringerung der Gussfehler wie z. B. Gaseinschlüsse, Narben und Penetration [64].



Bild 13: Einfluss der Schaumstoffmodelldichte auf Mikro- und Makroporosität [64]

Durch die thermische Zersetzung des Schaumstoffs kommt es zu einem erhöhten Gasvolumen, vor allem wenn die Modelldichte sehr hoch ist. Bei unzureichender Diffusion der Gase durch die Schlichte und den Sand, entstehen in verstärktem Maße Gasblasen im Gussstück. In **Bild 13** wird dieser Zusammenhang graphisch dargestellt. Die für die Vollformgießtechnik relevanten Modelldichten liegen zwischen 15 und 45 g/l, wobei der untere Wert durch mangelnde Modellfestigkeit und Formfüllung bei komplizierten Geometrien begrenzt wird; der obere Wert wird durch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen und erhöhtes Gasvolumen beim Gießen beschränkt.

Die Makrogasporosität weist in Abhängigkeit von der Modelldichte ein ausgeprägtes Minimum auf. Bei geringeren Schaumstoffmodelldichten als 20 g/l wird der vorrückenden Metallschmelze bei der Formfüllung im Gießvorgang nur ein geringer Widerstand entgegengesetzt, so dass aufgrund einer unberuhigten Formfüllung vermehrt Gasblasen im Gefüge eingeschlossen werden. Mit höheren Modelldichten wird die Füllung des entstehenden Formhohlraumes aufgrund des vermehrten Gasvolumens, das bei der thermischen Zersetzung des Schaumstoffmaterials entsteht, gedämpft und beruhigt. Andererseits führt jedoch das erhöhte Gasvolumen, hervorgerufen durch steigende Modelldichten, zu verstärkter Gasaufnahme im Gussstück.

Für die Makrogasporosität gilt, dass sie mit steigender Schaumstoffmodelldichte sowohl in ihrer Anzahl im Gussstück, als auch in der Größe der Luftblasen zunimmt. Dabei nimmt sie wesentlich stärker zu als die Mikroporosität. Dies ist aus der Tatsache zu erklären, dass sich bei großem Gasvolumen aus der Zersetzung von Modellen hoher Dichte beim Gießen kleine Gasporen aufgrund der Auftriebskräfte im flüssigen Metall zu größeren Blasen formieren können. Deswegen bleibt die Mikrogasporosität bei hohen Modelldichten nahezu konstant, wobei die Makrogasporosität deutlich ansteigt [65].

3.3.1.2. Einfluss der Schaumstoffmodellmontage

Die Modelle für das Vollformgießverfahren werden meist aus einzelnen Modellbestandteilen montiert. Dazu ist es notwendig, die einzelnen Teile entweder zu verschweißen oder zu kleben.

Modellverschweißung

Einen stärkeren Einfluss auf die Makroporosität als auf die Mikroporosität hat die Modellverschweißung. In **Bild 14** wird deutlich, dass das Gasvolumen nach Anzahl und Größe der Gasblasen mit stärkerer Verschweißung ansteigt.

"Die Modellverschweißung wird in wesentlichem Maße in der Bedampfungsphase des Fertigschäumprozesses beeinflusst, wobei durch Variation der Bedampfungszeiten und Bedampfungsdrücke unterschiedliche Energiemengen in das Schaumstoffmaterial eingebracht werden. Erhöhte Energiemengen führen dabei zu zusätzlichen Materialverbindungen, die die Schaumstoffperlen untereinander eingehen. Diese zusätzlichen Materialverbindungen müssen bei der thermischen Zersetzung des Schaumstoffs während des Gießvorganges wieder aufgelöst werden. Mit zunehmender Modellverschweißung wird - ähnlich wie mit dem dichteren Partikelverbund bei höherer Schaumstoffmodelldichte - die Makrogasporosität in den Gussstücken verstärkt. Die Mikrogasporosität steigt nur unwesentlich an, da sich die Mikroporen bei erhöhtem Auftreten zu Blasen formieren und zu einem Ansteigen der Makrogasporosität führen" [64].


Bild 14: Zunehmende Modellverschweißung lässt die Mikroporosität nur gering ansteigen, die Makroporosität – sehr [64]

Modellkleben

Für das Kleben von einzelnen Modellteilen zu "Modelltrauben" sind zwei Klebemethoden möglich: das Schmelzkleben (Kohäsion) oder Kontaktkleben (Adhäsion). Im **Bild 15** sind diese beiden Klebeverfahren graphisch gegenübergestellt, wobei auch hier ihr Einfluss auf die Makro- und Mikrogasporosität im Mittelpunkt steht. Es ist deutlich zu sehen, dass eine Abhängigkeit zwischen der Menge des verwendeten Klebers und der Porosität besteht.

Die Mikrogasporosität wird durch die im Modell eingebrachte Klebstoffmenge weder bei kohäsivem Klebstoff (Typ I) noch bei adhäsivem Klebstoff (Typ II) wesentlich beeinflusst. Die im Modell verarbeitete Klebstoffmenge hat dagegen einen recht deutlichen Einfluss auf die Makrogasporosität. Dieser Zusammenhang wird in **Bild 15** deutlich. Klebstofftyp I erhöht zunächst bis zu einer Klebstoffmenge von etwa 4 g die Makrogasporosität nur geringfügig. Bei mehr als 7 g Klebstoff steigt die Makrogasporosität dann jedoch nach Anzahl und Größe der Gasblasen recht deutlich an.



Bild 15: Einfluss der Klebstoffmenge auf die Porosität bei unterschiedlichen Klebemechanismen [66]

Die Relevanz des Zusammenhanges zwischen Klebstoffmenge und Makrogasporosität steigt erheblich mit der Anzahl der Fügestellen bei Modellen mit komplexen Geometrien, die sich aus mehreren Segmenten zusammensetzen. Es lassen sich deutlich Unterschiede zwischen verschiedenen Klebstoffen und Klebstoffmengen feststellen, so dass dem gesamten Gebiet der Modellmontage ein erheblicher Stellenwert für die Qualität der Gussstücke zukommt [66].

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die Eigenschaften, die einer verbesserten Oberflächenbeschaffenheit dienen, wie z. B. erhöhte Modelldichte, intensive Modellverschweißung sowie feinkörniger Schaumstoff, gleichzeitig negative Auswirkungen auf die Porosität und Festigkeit der hergestellten Aluminium-Gussstücke haben.

4. Forschungsziele und Aufgaben

Trotz der stetigen Weiterentwicklung des Vollformgießverfahrens bleibt beim Aluminium-Vollformguss die Porosität ein Problem. Es müssen die Ursachen aufgeklärt und die Einflussfaktoren bestimmt werden.

Die Dichte der Schaumstoffmodelle stellt nach 3.3.1.1 eine wesentliche Einflussgröße auf die Porosität der Gussstücke dar. Sie wird durch die Materialschüttdichte als Ergebnis des Vorschäumprozesses sowie durch den Formfülldruck als Prozesskenngröße des Fertigschäumens bestimmt. Mit zunehmender Modelldichte wird der vorrückenden Metallschmelze ein erhöhter Widerstand entgegengesetzt, der zu einer beruhigten und gerichteten Formfüllung oder gar zu einem kurzzeitigen Stoppen der Formfüllung führt.

Das Abführen der Zersetzungsprodukte ist als entscheidend für die Vermeidung der Porosität im Gussstück erkannt worden. Durch die Zersetzung des Schaumstoffmodells beim Abgießen können erhebliche Mengen an Gasen auftreten, die aus dem frei werdenden Formhohlraum abgeleitet werden müssen, um Gaseinschlüsse zu vermeiden. Hier spielen die Gasdurchlässigkeit der Schlichte und die des ungebundenen Quarzsandes eine wichtige Rolle.

Über die Porosität bei Aluminiumlegierungen, ihre Entstehungsursachen und Mechanismen, insbesondere beim Vollformgießen, existieren zahlreiche Theorien und Publikationen. Es fehlen jedoch Kenntnisse über die Auswirkungen der verschiedenen Einflussfaktoren auf die Größe, Form und Verteilung der Poren und Gaseinschlüsse. Gerade für die Vollformgießtechnik ist die Kenntnis des Einflusses der Prozessparameter auf die Porosität von grundlegender Bedeutung, da die technologische Beherrschung der Porosität die Voraussetzung für qualitativ hochwertigen Guss darstellt. Deshalb konzentriert sich das Interesse der Aufgabenstellung auf die wichtigen Prozessparameter des Vollformgießverfahrens und ihren Einfluss auf die Porosität. Damit wird einem wichtigen Anliegen der Praxis durch die vorgesehenen Untersuchungen Rechnung getragen.

Ausgehend von der oben genannten Problemstellung besteht das Ziel der vorliegenden Arbeit darin, den Einfluss der Formfüllgeschwindigkeit auf die Eigenschaften von Gussteilen, insbesondere auf die Porosität, beim Aluminium-Vollformgießverfahren zu untersuchen und Wege zur Bekämpfung der Porosität zu finden. Dazu sollen die Arten der Schmelzezufuhr verglichen werden. Ergebnisse des fallenden Vollformgießens müssen dem steigenden Vollformgießen gegenüber gestellt werden.

Es wird versucht, die oben genannten Nachteile wegen erhöhten Modellwiderstands, der zu einer beruhigten und gerichteten Formfüllung führt, zu Gunsten des Verfahrens zu nutzen. Deshalb muss der Zusammenhang zwischen dem Formfüllvorgang und der Porenentwicklung bei verschiedener Schmelzezufuhr beobachtet werden. Der bedeutsame Einfluss von Schlichten auf die Porosität wird untersucht. Die Wirkung von unterschiedlichen Druckverhältnissen beim Gießen ist Gegenstand weiterer Versuche. Schließlich wird die Effektivität einer Schmelzebehandlung auf die Porosität ermittelt.

Durch die Variation dieser Faktoren wird ein Bild über ihren tatsächlichen Einfluss auf die Porenentwicklung im Zusammenhang mit der Formfüllung gewonnen.

5. Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen zum Ablauf des Formfüllvorganges und des Einflusses auf die Porosität wurden im Rahmen eines Projektes auf dem Versuchsstand "Vollformgießen" des GIESSEREI-INSTITUTS der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt.

Zur Ermittlung des Einflusses des Formfüllvorgangs auf die Porosität der Gussteile wurden die in **Bild 16** aufgeführten Einflussfaktoren betrachtet:

- Verfahren,
- Gießart,
- Schlichte,
- Unterdruck,
- Schmelzbehandlung.

Beim Verfahrensvergleich wurden zusätzlich die mechanischen Festigkeitswerte verglichen.

Beim Vollformgießverfahren wurden die Parameter Modellwerkstoff, Gusswerkstoff, Gießtemperatur und Formstoff gemäß **Bild 17** nicht verändert.



Bild 16: Variation der Einflussfaktoren



Bild 17: Konstante Versuchsparameter

5.1. Das Messsystem für die Formfüllung

Die Geräte für die Messungen der Gießparameter wurden unter dem Aspekt einer einfachen Bedienbarkeit und der Kostenminimierung ausgewählt. Für die Messung der Formfüllung bzw. Formfüllgeschwindigkeit diente eine Methode, die nach dem Ohmschen Gesetz funktioniert, wobei der Messkörper als Widerstand wirkt.

Für die Ermittlung der Steighöhe fand ein Draht von 0,3 mm Durchmesser aus CrFeAl 135 nach DIN 17470 mit einem Widerstand von 19,1 Ω /m Verwendung. Die Länge des Drahts betrug 120 cm für die Modelle von 100 cm Länge und 50 cm bei den Modellen für die Zugstäbe. Nach dem Schaltbild in **Bild 18** wurde die Steighöhe der Metallschmelze in den einzelnen Probestäben erfasst [67].

Hierbei schließt die Schmelze mit Erreichen der unteren Probestabenden zuerst den Stromkreis und verringert anschließend durch ihr Ansteigen in den Probestäben den Widerstand R_K des innen liegenden Drahts durch Verkürzung der Länge des stromübertragenden Leiters. Über einen Vorschaltwiderstand R_v wird die Spannung für jeden Draht mit Hilfe der Messdatenerfassung festgehalten.



Bild 18: Prinzipschaltbild der Formfüllungsmessung beim Vollformgießen

Die Steighöhe der Schmelzsäule in den einzelnen Probestäben wurde durch folgende Gleichung bestimmt:

$$z(U_{K}) = 0.5m - \frac{10\Omega}{\left(\frac{8V}{U_{K}} - 1\right) \cdot 19.1 \cdot \frac{\Omega}{m}}$$

 $z(U_K)$ = Steighöhe; U_K = gemessene Spannung Gusswerkstoff

5.2. Die verwendete Legierung

Als Gusswerkstoff wurde die Aluminium-Silizium-Legierung G-AlSi6Cu4 verwendet (**Bild 19**). Sie wurde in Form von Masseln vom Auftraggeber für das Projekt bereitgestellt und weicht in ihrer Zusammensetzung nur unwesentlich von der DIN-Norm ab. Zum Schmelzen dieser Masseln diente ein Induktionsschmelzofen. Da die Gießtemperatur auf 730 °C konstant gehalten werden sollte, wurde die Schmelze angesichts des Temperaturverlustes beim Transport zum Versuchsstand auf 760 °C überhitzt.

AlSi6Cu4											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Cr
DIN	5,0-7,5	1,0	3,0-6,0	0,1-0,6	0,1-0,5	2,0	0,15	0,3	0,2	0,1	-
VW	5,0-7,0	0,6	3,0-5,1	0,4-0,6	0,2-0,3	1,1	0,1-0,2	0,3	0,3	-	-
VG	6,77	0,94	3,82	0,23	0,15	1,68	0,07	0,09	0,11	0,03	0,07
SG	6,64	0,94	3,70	0,22	0,19	1,48	0,07	0,08	0,11	0,03	0,05
KG	6,88	0,99	3,66	0,18	0,05	1,41	0,07	0,09	0,10	0,03	0,05

Bild 19: Zusammensetzung der Schmelze (VW - Betriebsnorm Volkswagen AG, VG – Vollformguss, SG – Sandguss, KG – Kokillenguss)

Die Schmelze wurde mit Argon (Ar) direkt vor dem Vergießen im Ofen gespült. Die Spüldauer betrug 10 Minuten. Argon ist ein inertes Gas und wirkt rein physikalisch bzw. mechanisch, indem der vorhandene Wasserstoff in die in der Schmelze aufsteigenden Spülgasblasen zum großen Teil hineindiffundiert und so ausgeschieden wird.

Für die Spektralanalyse wurden vor dem Abguss Proben entnommen. Anschließend wurde die Schmelze vom Gießtiegel in die Form bzw. in das Schaumstoffmodell gegossen.

5.3. Vorversuche

Um bei den vorgesehenen Experimenten das Ziel schneller und effektiver zu erreichen, wurden Vorversuche durchgeführt. Diese dienten zur Auswahl der Parameter, die später konstant bleiben sollten, sowie zum Test der geplanten Versuchsmethoden.

Für die Vorversuche standen Schaumstoffmodelle mit verschiedenen Abmessungen zur Verfügung. Die Festlegung der konstanten Parameter erfolgte sowohl durch die optische Beurteilung als auch durch die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Gussteile. Bei der optischen Prüfung galt als Hauptaugenmerk die Penetration, die häufig beim Vollformgießen auftritt.

Die Schmelzetemperatur in der Gießpfanne wurde mit dem betriebsüblichen Temperaturmeßsystem für Aluminiumschmelzen gemessen. Für die Beobachtung des Temperaturverlaufs in der Form wurden NiCr-Ni-Thermoelemente mit einer keramischen Isolierung 5 mm tief in das Schaumstoffmodell eingesetzt. Für die Datenerfassung auf einem PC waren zwei Möglichkeiten gegeben: Computerprogramme "WorkBench" und "DIA/DAGO". Diese Methoden wurden mit gleichen Thermoelementen getestet und die Ergebnisse verglichen. Die roten Punkte auf dem **Bild 20** sind die Messstellen.



Bild 20: Anordnung der Thermoelemente bei der DIA/DAGO–Datenerfassung

Mit dem Programm DIA/DAGO war die Möglichkeit gegeben, gleichzeitig an 10 verschiedenen Stellen die Temperatur zu messen (**Bild 21**). Die Anzeige der Thermoelemente sollte auch gleichzeitig die Formfüllung verfolgen lassen. Leider war auf Grund der zeitlichen Verzögerung der Datenaufnahme die Anfangsphase der Formfüllung nicht exakt zu bestimmen (**Bild 22**).



Bild 21: Temperaturverlauf gemessen mit der Software DIA/DAGO



Bild 22: Temperaturverlauf zwischen 0 und 40 sec nach Gießbeginn. Software DIA/DAGO



Bild 23: Temperaturverlauf zwischen 0 und 15 sec. nach Gießbeginn. Software WorkBench

Am Datenkabel für die WorkBench-Messung dagegen konnten nur max. 4 Thermoelemente und mehrere Widerstandsdrähte angeschlossen werden. Die mit der WorkBench-Messung aufgenommenen Erstarrungskurven geben den Verlauf genauer wieder als die mit der DIA/DAGO-Messung (**Bild 23**). Alle weiteren Experimente wurden mit der WorkBench-Messung durchgeführt.

Mit Hilfe der Widerstandsdrähte konnte der gesamte Formfüllvorgang (Füllhöhe) kontinuierlich als Funktion der Zeit in Form von Diagrammen aufgenommen werden (**Bild 24**).



Bild 24: Beispiel des Formfüllvorgangs. Software WorkBench

In einfachen Probegusskörpern (rohrförmige Stäbe von 1000 mm Länge, Innendurchmesser von 12 mm, Außendurchmesser 30 mm) wurde die Metallsteiggeschwindigkeit ermittelt. Bei den ersten Versuchen wurden die Widerstandsdrähte nicht von außen eingesetzt, sondern innen im Hohlraum des Stabes aus Schaumstoff befestigt. Dies verursachte einen Messdatenfehler während des fallenden Gießens. Der Fehler bestand darin, dass die Schmelze in den Hohlraum eindrang und das Ende des Drahts berührte, wodurch die aufgezeichneten Ergebnisse eine vertikale Linie statt einer zeitlich fallenden Kurve bilden. Bei den nächsten Versuchen wurden die Widerstandsdrähte auf der Außenseite der Stäbe angebracht.



Bild 25: Beispiel des Temperaturverlaufs an Stäben von 1000 mm Länge



Bild 26: Beispiel des Temperaturverlaufs zwischen 0 und 10 sec an Stäben mit 1000 mm Länge

In einer Reihe von Experimenten wurde bei denselben Stäben die Temperatur an zwei oder drei Stellen gemessen (**Bild 27**):

- oben, in der Nähe des Eingusses,
- in der Mitte und
- im unteren Teil.



Bild 27: Anordnung der Thermoelemente bei der WorkBench-Messaufnahme. Die roten Punkte auf dem Bild sind die Messstellen

Die gewonnenen Daten dienten zur Beobachtung der Erstarrung und des Temperaturverlustes der Schmelze. Im Ergebnis dieser Messungen wurde die später einzuhaltende Gießtemperatur festgelegt (**Bild 25** und **Bild 26**).



Bild 28: Steigende Formfüllung an Stäben mit und ohne Schaumstoffmodell von 1000 mm Länge mit verschiedenen Querläufen:
S-S_1 ohne Modell mit 30 mm Durchmesser Querlauf,
S-S_2 ohne Modell mit 20 mm Durchmesser Querlauf,
V-S mit Modell mit 30 mm Durchmesser Querlauf

Zur Bestimmung der Geometrie und der Abmessungen des Eingusssystems wurden die Vorversuche sowohl steigend als auch fallend durchgeführt und dabei der Einfluss auf die Formfüllgeschwindigkeit beobachtet. Die ersten Gussteile mit einem Eingusssystem aus Schaumstoff wurden steigend abgegossen. Wegen der dabei zusätzlich entstehenden Zersetzungsgase und der verlängerten Gießzeiten wurde das Anschnittsystem aus Schaumstoff später durch Querläufe mit Querschnitten 8 x 20 mm bis 10 x 30 mm sowie von 20 und 30 mm Durchmesser ersetzt (**Bild 28**).

6. Versuchsbeschreibung

6.1. Sandguss

Für den direkten Vergleich zwischen Sandguss und Vollformguss hinsichtlich Formfüllung und Temperaturveränderung wurde eine Holzmodellplatte mit den Abmessungen des Schaumstoffmodells für den Sandguss gefertigt (**Bild 29**). Als Formstoff kam Grünsand zum Einsatz. Zwei Formkastenhälften wurden mit Formstoff gefüllt und dieser anschließend verdichtet. Für die Messung der Formfüllgeschwindigkeit wurden die Widerstandsdrähte für die einzelnen Stäbe (insgesamt 4 Stück) eingefügt und befestigt. Zur Temperaturmessung kamen Thermoelemente zum Einsatz. Nach Abschluss einer Reihe der Experimente wurden wegen der beabsichtigten Änderung der Schmelzezufuhr die Modellplatte und dementsprechend die beiden Formkastenhälften umgebaut. Die Abmessungen des Modells blieben dabei unverändert. Die dritte Variante der Schmelzezufuhr, die steigend von der Mitte des Quersteges erfolgen sollte, konnte beim Sandguss wegen zu aufwändiger Umbauarbeiten nicht praktiziert werden. Das Auspacken erfolgte etwa eine Stunde nach dem Abgießen.



Bild 29: Modelleinrichtung für Sandguss

Diese Versuche sollten auch für die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften und der Beschreibung des Gussgefüges dienen.

6.2. Kokillenguss

Zum Vergleich des Gussgefüges und der mechanischen Eigenschaften sollte auch der Kokillenguss herangezogen werden. Kokillengussteile zeichnen sich durch feinere Struktur und höhere Festigkeitseigenschaften aus.



Bild 30: Stabkokille

Wegen der hohen Kosten konnte keine Kokille mit den gleichen Modellabmessungen wie das für Sand- und Vollformgießverfahren verwendete Modell hergestellt werden. Dafür kam eine vorhandene Kokille (**Bild 30**) für einen Stab mit den Abmessungen von 20 mm Durchmesser und 200 mm Länge (wie die Stäbe des Schaumstoffmodells) zum Einsatz. Die Schmelze wurde in die Kokille fallend gegossen.

6.3. Vollformguss

6.3.1. Schaumstoffmodell

Für die Untersuchungen mit dem Vollformgießverfahren stand ein Schaumstoffmodell gemäß **Bild 31** zur Verfügung.

Aufgrund der Zersetzung des Schaumstoffs beim Gießen muss der gesamte Formfüllvorgang anders als bei den Sand- oder Kokillengießen betrachtet werden.

Die Schaumstoffmodelle aus EPS für das Vollformgießverfahren, die so genannten Zugstäbe, bestehen, wie im **Bild 31** gezeigt, aus drei runden Stäben und einem Stab mit viereckigem Querschnitt in den dargestellten Abmessungen.



Bild 31: Schaumstoffmodell für Zugstäbe



Bild 32: Messstellen am Schaumstoffmodell: Punkte - Thermoelemente, Linien - Widerstandsdraht

Für die Messung der Formfüllgeschwindigkeit wurden alle Stäbe des Modells vertikal, d.h. in Längsrichtung, oberflächlich aufgeschnitten, um die Widerstandsdrähte einzusetzen. Die Tiefe der Schnitte betrug bis max. 1 mm (**Bild 32**). Anschließend wurden die Modelle geschlichtet und zum Trocknen aufgehängt.



Bild 33: Schematische Darstellung vom Versuchsaufbau

Zur Beobachtung des Erstarrungsvorgangs wurden die Modelle vor dem Einbetten im Formkasten an ausgewählten Stellen mit den Thermoelementen versehen (**Bild 33**).

6.3.2. Schlichten

Für die Experimente standen die beiden wasserlöslichen Schlichten Disopast 5000 und Disopast 6369/10 zur Verfügung.

Die Beschichtung der Schaumstoffmodelle erfolgte durch Tauchen. Die Schlichteschichtdicke wurde mit 0,2 mm bzw. 0,8 mm ermittelt. Die geschlichteten Modelle wurden bei Raumtemperatur von 22 - 24 °C 24 Stunden an Luft getrocknet.

6.3.3. Einbetten

Als Formkasten diente ein Behälter gemäß **Bild 34** mit den Innenabmessungen 500 x 600 x 800 mm. Zur Erzeugung des Unterdruckes kann eine Vakuumpumpe angeschlossen werden, um die während der Zersetzung der Schaumstoffmodelle entstehenden Gase abzuführen.



Bild 34: Vibrationstisch mit dem Formkasten

In diesem Behälter war es möglich, gleichzeitig drei bis vier Schaumstoffmodelle einzuformen. Die Modelle wurden einzeln abgegossen, damit für alle Abgüsse eine konstante Gießtemperatur gewährleistet werden konnte. Um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden, wurden die einzelnen Schaumstoffmodelle zusätzlich durch 8 mm dickes Stahlblech voneinander getrennt. Der leere Behälter wurde vor der Verdichtung auf dem Vibrationstisch festgeschraubt.

Am Vibrationstisch befinden sich zwei Vibratoren, die ein gutes Einbetten der Schaumstoffmodelle ermöglichen.

Bereits während des Befüllens des Behälters mit Quarzsand wurden die Schaumstoffmodelle durch Vibration in den Sand eingebettet.

Die Schaumstoffmodelle wurden einzeln abgegossen und nach der Abkühlung der Gussteile diese durch die Kippvorrichtung des Behälters vom Sand getrennt.

6.4. Visuelle Gussteilprüfung

Die Gussteile wurden auf verschiedene Eigenschaften untersucht. Die Proben wurden zielgerichtet je nach der Art der Prüfung entnommen, optisch begutachtet und weiter zur Auswertung vorbereitet.

Die visuelle Begutachtung der abgegossenen Probestücke ergab unabhängig von den gewählten Parametern eine strukturierte Gussoberfläche, die den Abdruck der EPS – Perlen wiedergibt sowie Kaltschweißstellen und Penetration (**Bild 35**).



Bild 35: Gussfehler an Proben beim Vollformgießverfahren (Vorversuche) a) Penetration; b) Kaltschweiße; c) Abdruck der EPS–Perlen; d) Gasblase

Von der Penetration waren infolge des hohen metallostatischen Drucks besonders unten liegende Abschnitte der 1000 mm langen Stäbe beim fallenden Guss betroffen (**Bild 35**, a).).

6.5. Probenvorbereitung und Kennwertermittlung

Die Proben für die Bestimmung der Porosität wurden in Abständen von 30 mm entnommen (**Bild 36**). Die gleichen Proben dienten außerdem für die Härtemessung und Gefügebeurteilung. Geschliffen wurde die Probenfläche gemäß **Bild 37**.

Nach der Vorbereitung der Schliffproben wurden die Gussteile mikroskopisch beurteilt. Das Hauptaugenmerk lag auf der Porosität. Die Untersuchung erfolgte mit dem Auflichtmikroskop "Neophot 30" und der Software "Image C". Weiter wurden Korngröße und Verteilung der Ausscheidungen analysiert.



Bild 36: Reihenfolge der Probenentnahme im Abstand von 30 mm bei fallendem und steigendem Gießen



Bild 37: Schleifflächen der Proben

6.5.1. Dichtebestimmung

An den Proben für die metallografischen Untersuchungen wurde vor dem Polieren die Dichte gemessen. Zur Bestimmung der Dichte diente ein Versuchsaufbau entsprechend **Bild 38** nach dem Prinzip der Differenz-Wägung an Luft und im Wasser.

Die ermittelte Dichte kann jedoch nicht als Werkstoffkennwert der entsprechenden Legierung betrachtet werden, sondern ist lediglich ein Maß für die Porosität des Probekörpers.



Bild 38: Versuchsstand zur Dichtebestimmung

Die Werte der Proben aus dem oberen Teil fallen in der Regel niedriger aus als die aus dem unteren Teil der Probestäbe. Der Grund dafür liegt in der höheren Porosität der Proben im oberen Bereich der Probestäbe, die durch das Ansammeln von Zersetzungsprodukten des Schaumstoffmodells verursacht wird. Das ist ein Zeichen dafür, dass die Gasdurchlässigkeit des Gesamtsystems nicht hinreichend groß ist, um die Zersetzungsprodukte des EPS-Modells aus dem Formhohlraum abzuführen.

6.5.2. Härte

Die Härteprüfung erfolgte nach Brinell (EN 10003-1) an den Proben für die metallografische Untersuchung. Wie üblich für Al-Proben wurden die Kugeldurchmesser von 2,5 mm, die Prüfkraft von 612,9 N und die Einwirkdauer von 10 Sekunden gewählt.

7. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Ausgehend von den vorliegenden Ergebnissen und theoretischen Überlegungen scheint beim fallenden Gießen anfänglich kein Gasspalt zwischen der Schmelze und dem Schaumstoffmodell zu existieren. Das ist die Folge des metallostatischen Drucks der Schmelze. Das Füllen der Form ist zunächst hydrodynamisch und gleicht sich der Geschwindigkeit an, die jener entspricht, die durch den Druck der Zersetzungsgase im Spalt zugelassen wird. Bei den großen Formfüllgeschwindigkeiten ist anzunehmen, dass zunächst nur flüssige Zersetzungsprodukte entstehen.

7.1. Einfluss der untersuchten Variablen auf die Porosität

Bei den Formfüllvorgängen ist häufig beobachtet worden, dass beim fallenden Gießen die Schmelze, nachdem sie die zwei mittleren Stäbe des Schaumstoffmodells gefüllt hat, in die äußeren Stäbe von unten steigt, bis sie den von oben kommenden Schmelzefluss trifft. Die Schmelze kontaktiert also das Ende des Messdrahts in den äußeren zwei Stäben noch bevor sie vollständig gefüllt sind. Das erklärt die anormalen Füllzeiten dieser Stäbe. Um falsche Aussagen zu vermeiden, wurden nur die Formfüllzeiten der mittleren zwei Stäbe dargestellt.

Für die Darstellung der Porosität von Gussteilen ist es wichtig, die Porenverteilung im Gusskörper und die Richtung der Änderung von der Porosität zu wissen. Die lineare Darstellung der Porositätswerte hat sich als notwendig gezeigt, um die Tendenz der Porenhäufung besser zu erkennen.

7.1.1. Gießart

Vorteile des fallenden Gießens gegenüber dem steigenden Gießen sind hauptsächlich wirtschaftliche Faktoren. Beim fallenden Gießen entfällt fast das gesamte Eingusssystem. Bei Einzelgussstücken sind weder Querläufe, Anschnitte noch Gießtrichter erforderlich, benötigt wird lediglich der Einguss. Dies spart aufwändige Arbeiten für die Modellplattenfertigung und die Formherstellung, beim Vollformgießen außerdem Schaumstoffmaterial. Demzufolge wird weniger Schmelze verbraucht, d. h. Energie und Einsatzmaterial werden eingespart. Außer wirtschaftlichen Vorteilen ergeben sich für das fallende Gießen deutlich geringere Formfüllzeiten. Dies ist sehr wichtig bei der Herstellung von Seriengussteilen. Bei herkömmlichen Gießverfahren wird häufig zur Vermeidung turbulenter Formfüllung das steigende Gießen gewählt. Da das Schaumstoffmodell beim Vollformgießen aufgrund seines Widerstands keine besonders hohen Füllgeschwindigkeiten zulässt, ermöglicht auch das fallende Gießen eine ruhige Formfüllung.

Um direkt vergleichen zu können, welche Auswirkungen das fallende Gießen auf die Gussteilporosität beim Vollformgießverfahren haben könnte, wurden Versuche mit beiden Methoden durchgeführt (**Bild 16**).

Die beim steigenden Vollformguss aufgenommenen Daten wurden mit denen vom Sandguss verglichen (**Bild 39**). Die Formfüllzeiten sind, wie erwartet, beim Vollformguss wesentlich länger und demzufolge sind die Füllgeschwindigkeiten kleiner als die bei Sandguss (**Bild 40**). Es ist deutlich aus diesen beiden Diagrammen zu entnehmen, dass die Formfüllzeiten beim fallenden Vollformguss länger sind als die bei Sandguss und kürzer als die beim steigenden Vollformguss.



Bild 39: Formfüllzeit bei unterschiedlicher Gießart



Bild 40: Formfüllgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Gießart

Die gemessenen Daten stellen die "Netto-Füllzeit" dar. Die Zeit, die die Schmelze vom Einguss durch das Gießsystem bis zum Modell(-hohlraum) benötigt, ist in den Diagrammen nicht berücksichtigt. Diese Zeiten sind beim fallenden Gießen erheblich niedriger als beim steigenden Gießen mit dem aufwendigen Anschnittsystem.

Da das Ziel der Versuche darin bestand, die reinen Füllvorgänge zu erforschen, wurde das Gießsystem nicht aus Schaumstoff gefertigt, sondern hohl gelassen. Dies ist unter industriellen Bedingungen beim Vollformgießen nicht der Fall und die Zersetzung des Schaumstoffs im Gießsystem erfordert zusätzliche Zeit.

Bezieht man das Anschnittsystem in die Betrachtung mit ein, in dem die Zeit für den Schmelzefluss bis zum Erreichen des Schaumstoffmodells berechnet wird ("Brutto-Füllzeit"), so ergeben sich die Darstellungen in **Bild 41** und **Bild 42**.



Bild 41: Korrigierte Formfüllzeit bei unterschiedlicher Gießart

Der zeitliche Vorteil des fallenden Vollformgießens ist unübersehbar. Außerdem werden die Zersetzungsprodukte vom Eingusssystem beim steigenden Vollformguss durch die Schmelze in das Gussstück hineingedrängt und damit die Porositätswerte erhöht.



Bild 42: Korrigierte Formfüllgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Gießart



Gießen mit Disopast 5000, Unterdruck und Entgasung

Bild 43: Porositätsverteilung in Abhängigkeit von der Gießart

Beim Vergleich der Porositätswerte zwischen steigendem und fallendem Gießen fällt auf, dass die Verteilung der Porosität im Stab die gleiche Tendenz aufweist (**Bild 43**). Sie vergrößert sich in beiden Fällen von oben nach unten. Die gasförmigen Zersetzungsprodukte haben zu wenig Zeit, vor der Erstarrung der Schmelze die Form zu verlassen und verbleiben zwangsläufig im Gussstück.

Beim steigenden Gießen ist die Schlichteschicht auf dem oberen Teil des Modells noch nicht mit den Zersetzungsprodukten übersättigt, weil sich darunter noch der feste Schaumstoff befindet. Erst am Ende des Füllvorgangs wird diese Partie für die Gase durchlässig. Ein anderes Bild ergibt sich bei der Vergasung seitlicher Schaumstoffmodell-Partien. In diesem Bereich werden die gasförmigen Zersetzungsprodukte zunächst seitlich durch die Schlichteschicht gedrängt und steigen anschließend nach oben.

Beim fallenden Gießen werden die zersetzten Teile des Schaumstoffmodells durch die Schmelze mit nach unten genommen. Während der Formfüllung verliert die Schmelze an Temperatur und beginnt relativ schnell zu erstarren. Die Folgen sind eine größere Anzahl von Poren im unteren als im oberen Bereich des Gussstücks. Auffällig ist die geringe Streuung der Porosität im Stab in beiden Fällen.

7.1.2. Schlichte

Die Schlichte sorgt nicht nur für die Oberflächenbeschaffenheit, sie verhindert auch die sofortige Ableitung der Zersetzungsprodukte des Schaumstoffs in den Sand und damit die turbulente Füllung der Form. Sie wirkt wie ein Filter zwischen dem Spalt und dem Sand, der die Formfüllung verlangsamt.

Um ein klares Bild der Funktionsweise der Schlichte zu gewinnen, wurden für die Untersuchungen zwei Schlichten mit unterschiedlichen Eigenschaften ausgewählt und mit Modellen ohne Schlichtebeschichtung verglichen (**Bild 16**).

Die Formfüllzeit der Gussteile von ungeschlichteten Schaumstoffmodellen und von denen mit der 0,2 mm dünnen Schicht von Disopast 5000 war am kürzesten (**Bild 44**). Beim Füllvorgang ohne Schlichte existiert für die gasförmigen Zersetzungsprodukte überhaupt kein Hindernis, direkt in den Sand zu entweichen. Deshalb tritt eine geringere Behinderung der Schmelze bei der Formfüllung auf. Die dünne Schlichteschicht von 0,2 mm behindert den Übergang von gasförmigen Zersetzungsprodukten in den Sand nur unwesentlich.

Bei den Schaumstoffmodellen mit einem 0,8 mm dicken Schlichteüberzug von Disopast 5000 ist der Formfüllvorgang langsamer als bei den Schlichteüberzügen mit den Schichtdicken von 0,2 mm der verwendeten Schlichten. Dafür ist die geringere Gasdurchlässigkeit einer dicken Schlichteschicht verantwortlich.

Ausgehend von den Formfüllzeiten können die Formfüllgeschwindigkeiten errechnet werden. Je länger die Formfüllzeit desto kleiner die Formfüllgeschwindigkeit und umgekehrt (**Bild 45**).





Bild 44: Einfluss der Schlichte auf die Formfüllzeit



fallendes Gießen mit Unterdruck

Bild 45: Einfluss der Schlichte auf die Formfüllgeschwindigkeit

fallendes Gießen mit Unterdruck



Bild 46: Einfluss der Schlichte auf die Porositätsverteilung

Die lineare Darstellung zeigt die Tendenz der Porenverteilung im Stab. Bei unbeschichteten Modellen verringert sich die Porosität von oben nach unten. Bei den Modellen mit den dünnen Schlichten dagegen nimmt sie zu. Bei einem dicken Schlichteüberzug bleibt die Porosität über die Stabhöhe nahezu konstant (**Bild 46**).

Da der Quarzsand eine größere Gasdurchlässigkeit besitzt als die Schlichten, sind die Formfüllgeschwindigkeiten bei Modellen ohne Schlichte größer und es werden mehr Zersetzungsprodukte in die Schmelze eingeschlossen. Es ist zu vermuten, dass die Schmelze hauptsächlich flüssige Produkte aufnimmt, die dann in der Schmelze weiter vergasen und sich nach oben bewegen. Wegen des zeitlich kürzeren Formfüllvorgangs haben die Gasblasen in der Schmelze mehr Zeit nach oben zu wandern oder das Gussstück zu verlassen, bevor es beginnt zu erstarren.

Bei den ungeschlichteten Modellen ist eine große Streuung der Porosität in den Stäben zu beobachten. Der Grund liegt in den höheren Strömungsgeschwindigkeiten und demzufolge in der turbulenten Formfüllung. Auch die Gussteile aus den Schaumstoffmodellen mit den 0,2 mm dünnen Schlichten zeigen eine Streuung der Porosität. Dies wird mit immer noch zu großen Füllgeschwindigkeiten erklärt. Am besten verteilt ist die Porosität bei Gussstücken mit der 0,8 mm dicken Schlichteschicht. Der Volumenanteil der Poren ist in der ganzen Stablänge nahezu gleichmäßig.

7.1.3. Unterdruck

Sowohl die gasartigen als auch die flüssigen Zersetzungsprodukte wandern durch die Schlichte in den Sand und lagern sich dort ab. Da die flüssigen Zersetzungsprodukte durch die Hitzeeinwirkung weiter in Gas umgewandelt werden, besteht die Gefahr des Eindringens von Gasen ins Gussteil hinein. Als Ergebnis entstehen Gasblasen.

Mit Hilfe eines Unterdrucks werden die Gase vom Sand abgesaugt. Dies vermindert deutlich die Porosität in den Gussstücken. Infolgedessen läuft der Formfüllvorgang schneller ab (**Bild 47** und **Bild 48**).



fallendes Gießen mit Disopast 5000, dünn

Bild 47: Formfüllzeit in Abhängigkeit vom Unterdruck

fallendes Gießen mit Disopast 5000, dünn



Bild 48: Einfluss von Unterdruck auf die Formfüllgeschwindigkeit



steigendes Gießen mit Disopast 5000, dick

Bild 49: Einfluss des Unterdrucks auf die Porositätsverteilung beim steigenden Gießen
Der Einsatz des Unterdrucks scheint danach bei den Schaumstoffmodellen mit einem dicken Schlichteüberzug nicht sehr effektiv gegen die Porosität zu wirken (**Bild 49**). Die bei den Untersuchungen gewonnenen Werte unterscheiden sich kaum von einander.

Bei der 0,8 mm dicken Schlichteschicht von Disopast 5000 ist kein Einfluss auf die Porosität durch Unterdruck erkennbar.

Bei den Modellen mit der 0,2 mm dünnen Schlichteschicht dagegen gelingt es durch den Unterdruck, die Zersetzungsprodukte von der Schmelzefront abzuziehen und damit die Porosität geringfügig zu reduzieren (**Bild 50**). Die Porositätsverteilung wird dadurch allerdings nicht beeinflusst. Die Streuung der Werte ist genauso wie beim Abguss ohne Unterdruck.



fallendes Gießen mit Disopast 6369/10

Bild 50: Einfluss von Unterdruck auf die Porositätsverteilung (Disopast 6369/10)

7.1.4. Schmelzebehandlung

Die Schmelzebehandlung erfolgte durch eine Entgasung. Die Schmelze wurde unmittelbar vor dem Abguss mit Argon 10 Minuten lang gespült.

Beim Formfüllvorgang ist der Einfluss der Entgasung deutlich zu erkennen. Die Schmelze ist frei von Wasserstoffeinschlüssen, die normalerweise Porosität in Aluminiumlegierungen verursachen. Sie kann mehr gasförmige Zersetzungsprodukte aufnehmen als ohne Entgasung. Infolgedessen ist der Widerstand vom Schaumstoffmodell geringer und die Formfüllung wird beschleunigt (**Bild 51**). Die Formfüllgeschwindigkeit nimmt zu (**Bild 52**).

Unabhängig von der Schlichte sinkt die Porosität durch die Entgasung der Schmelze mit Argon um mehr als 1%. Die lineare Darstellung zeigt die gleich bleibende Tendenz (**Bild 53**). Die Streuung der Werte ändert sich kaum durch die Schmelzebehandlung.



fallendes Gießen mit Disopast 6369/10 und Unterdruck

Bild 51: Einfluss der Schmelzebehandlung auf die Formfüllzeit





Bild 52: Einfluss der Schmelzebehandlung auf die Formfüllgeschwindigkeit



fallendes Gießen mit Disopast 6369/10 und Unterdruck

Bild 53: Einfluss einer Schmelzebehandlung auf die Porositätsverteilung

7.2. Visualisierung des Prozesses der Formfüllung beim Vollformgießen

Nach Auswertung der Ergebnisse kann ein Bild dargestellt werden, das den Formfüllvorgang beim fallenden Gießen beschreibt (**Bild 54**). Dieser Darstellung liegen sowohl die Abkühlungs- und Formfüllungskurven der Gussteile, als auch der Zersetzungsablauf der Schaumstoffmodelle zugrunde. Der gesamte Prozess kann in drei Hauptphasen geteilt werden:

- In der ersten Phase gelangt die Schmelze vom Gießtiegel zunächst in den Einguss und drängt sich mit höherer Geschwindigkeit in das Modell hinein,
- Nach wenigen Sekunden wird die Schmelze durch den Widerstand des Schaumstoffmodells, das zur Verflüssigung und Vergasung Zeit benötigt, gebremst und kommt gar zum Stehen. Dies wird als zweite Phase betrachtet,
- Die dritte Phase ähnelt der ersten. In dem Maße, wie die Zersetzungsprodukte abgeführt werden, fließt die Schmelze weiter herunter. Die Geschwindigkeit steigt rasch.

Abhängig von vielen Einflussfaktoren wie z. B. Geometrie des Gussteils, Gasdurchlässigkeit des Systems und Dichte des Schaumstoffmodells, kann der oben beschriebene Prozess mit den drei Phasen einerseits nicht vollständig, andererseits aber auch mehrmals ablaufen.

7.2.1. Vorgänge an der Grenzfläche Schaumstoffmodell - Schmelze

Die Temperatur des Schaumstoffmodells gleicht der Raumtemperatur. Das Polystyrol zersetzt sich endotherm, d. h. es nimmt Wärme auf. Infolge der schlagartigen Berührung der Schmelze mit dem Modell und der örtlich unzureichenden Wärmemenge aus der Schmelze gelingt es dieser nicht, das Schaumstoffmodell sofort vollständig zu zersetzen, so dass nur die flüssigen Produkte entweder vom flüssigen Metall umschlossen oder in die Schlichteschicht gelangen. Daher bildet sich auch zwischen der Schmelzefront und dem Schaumstoffmodell in der ersten Phase kein Spalt (**Bild 55**).



Bild 54: Visualisierung des Formfüllvorgangs beim fallenden Gießen



Bild 55: Formfüllung ohne Gasspalt zwischen Schmelze und Schaumstoffmodell beim fallenden Guss

Nachdem die Schlichte keine flüssigen Reaktionsprodukte mehr aufnehmen kann, sammeln sich diese zwischen der Schmelze, der Schlichte und der noch festen Schaumstoffmodelloberfläche. In der Folge vergasen die flüssigen Reaktionsprodukte und bilden einen Spalt, in dem Gas vorhanden ist. Durch die Gase entsteht im Spalt höherer Druck, wodurch die Schmelze aufgehalten oder gar zurückgedrängt werden kann. Bei den Geschwindigkeitsdiagrammen ist dieses Ereignis durch negative Geschwindigkeitswerte gekennzeichnet (Bild 56). Auch bei den Formfüllungskurven ist ein Rückgang der Schmelze deutlich erkennbar.

fallendes Gießen mit Disopast 5000 und Unterdruck



Bild 56: Formfüllungsverlauf und Füllgeschwindigkeit

Der Spalt hat eine geringere Wärmeleitfähigkeit und verhindert die weitere Zersetzung des Schaumstoffmodells. Für eine zusätzliche Abbremsung der Formfüllung sorgt das flüssige Polystyrol. Das wiederum bildet auf dem festen Schaumstoffmodell eine Schicht, die die Wärmeübertragung zwischen der Schmelzefront und dem Schaumstoffmodell verringert.

Danach vergasen die flüssigen Bestandteile, die in den Schlichteporen eingelagert waren, und wandern in den Sand hinein. Damit wird Platz für die weiteren flüssigen und gasförmigen Teilchen geschaffen, und die Schmelze füllt wieder die Form. Die hohe Geschwindigkeit unmittelbar nachdem die einfließende Schmelze bis zum Stillstand gebremst wurde, kann auch dadurch erklärt werden, dass das Modell während der Zersetzung schon bei 80 °C bis zu 80 % seines Volumens schrumpft und damit weiteren Platz schafft (**Bild 57** und **Bild 58**).



Bild 57: Visualisierung der Zersetzung des Schaumstoffmodells beim fallenden Guss

In der dritten Phase wird der Gasspalt immer kleiner und verschwindet, sobald die Schmelze schneller herunter fließt, als das Gas entsteht. Die Formfüllung verläuft weiter ohne Spalt. Die Schmelzefront und das Modell sind in ständiger Berührung.



fallendes Gießen mit Disopast 6369/10



Die Spitze der Schmelzefront ist am Anfang scharfkantig, wird allmählich runder und dann sogar fast flach. Nach einiger Zeit beginnt sich die Spitze wieder abzurunden und wird wie am Anfang wieder scharfkantig.

Ein Teil der flüssigen Zersetzungsprodukte wird von der Schlichte aufgenommen. Aufgrund der hohen Temperatur gehen sie in den gasförmigen Zustand über. Infolge des herrschenden Drucks gelangen die Gase über feine Kanäle und Poren in der Schlichte in den Sand. Je größer diese Poren sind und je höher der Druck von innen ist, desto schneller gehen die Gase in den Sand über (**Bild 59**).



Bild 59: Übergang der Zersetzungsprodukte durch Kanäle in der Schlichte

Die Wahrscheinlichkeit, dass flüssige Zersetzungsprodukte in den Sand gelangen, ist sehr gering. Dies hängt von der Schlichte ab, ob sie fähig ist, die Flüssigkeit hindurch zu lassen. Würden flüssige Zersetzungsprodukte den Sand erreichen, dann lagern sie sich zwischen den Sandkörner ab. Reicht das Wärmeangebot der Schmelze bis in die Sandschichten hinein, dann werden die Flüssigprodukte auch dort weiter zersetzt und in Gase umgewandelt. Diese dringen im Sand weiter vor und kondensieren in kälteren Schichten (**Bild 60**, 1. Stufe). Deswegen muss der Sand auch beim Vollformgießverfahren gelegentlich regeneriert werden. Andernfalls wird der Sand unfähig, weitere Zersetzungsprodukte aufzunehmen.

In der ersten Stufe im **Bild 60** sind die Kanäle der Schlichte mit Gasen gefüllt, da sie unmittelbar im Kontakt mit der heißen Schmelze stehen. Die Kanäle in der zweiten Stufe sind durch gasförmige und flüssige Zersetzungsprodukte übersättigt. Flüssige Reaktionsprodukte erreichen den Sand und fließen langsam abwärts. Dies begünstigt die Verstopfung der Schlichtekanäle in der dritten Stufe, die die Schmelze noch nicht erreicht hat. Flüssige Reaktionsprodukte zersetzen sich auch in den Kanälen weiter. Da die Gase nicht in den Sand übergehen können, weil er mit den flüssigen Reaktionsprodukten verstopft ist, wandern sie in weiter unten liegende Kanäle und kondensieren dort infolge niedrigerer Temperaturen.



Bild 60: Verhalten von Zersetzungsprodukten im Sand

Die Formfüllung verlangsamt sich. Die Schmelze kann nicht mehr nach unten fließen, da das eigentlich gasdurchlässige System mit den Zersetzungsprodukten verstopft ist und keine weitere Gase und Flüssigkeiten aufnehmen kann. Die Schmelze kommt zum kurzzeitigen Stillstand, bis die im Sand befindlichen flüssigen Zersetzungsprodukte vergasen und dadurch Platz für nachfolgende Reaktionsprodukte schaffen. Der Schmelze wird dadurch zusätzlich Wärme entzogen. Es findet eine Sekundärpyrolyse im Sand und in den Kanälen der Schlichte statt.

8. Erstarrung und Gefügeausbildung

Der Erstarrungsvorgang beim Vollformguss, wie es auch aus **Bild 61** zu entnehmen ist, wird sich von dem beim Sandguss nicht unterscheiden. Der Temperaturverlust der Schmelze ist hier während des Gießens höher als beim Sandguss. Dies ist die Folge des Wärmeentzuges für die thermische Zersetzung des Schaumstoffmodells.



Bild 61: Temperaturverlauf in oberen und unteren Messstellen

8.1. Gefüge

Bei den durchgeführten Untersuchungen kam ausschließlich die Aluminium-Silizium – Legierung G-AlSi6Cu4 zum Einsatz. Unterschiedliche Festigkeitseigenschaften aufgrund von Konzentrationsänderungen der Legierungselemente waren daher nicht zu erwarten.

Von Interesse war lediglich ein Vergleich der erzielten mechanischen Festigkeitswerte bei den einzelnen Verfahren. Naturgemäß durfte zwischen dem Vollformgießen und dem Sandguss, bedingt durch ähnlich hohe Wärmeentzugsgeschwindigkeit der Formstoffe kein großer Unterschied zwischen den Festigkeitswerten ermittelt werden, wenn nicht unterschiedliche Porositätsanteile auch Differenzen in den Festigkeitseigenschaften widerspiegeln. Gegenüber

dem Kokillenguss sind veränderte Korngrößen und damit auch Festigkeitsunterschiede zu erwarten (Bild 62).



Bild 62: Makrogefüge von G-AlSi6Cu4



Bild 63: Mikrogefüge von G-AlSi6Cu4

Die Gefügeausbildung in den Vollformgussteilen unterscheidet sich mit der in den Sandgussteilen nicht. Das Gefüge entwickelt sich unabhängig von den als Poren eingeschlossenen Zersetzungsprodukten des Schaumstoffmodells. Auf den Schliffbildern sind sowohl primär ausgeschiedenes Silizium als auch eutektisches Phasengemenge AlSiFeMn und Mg₂Si deutlich zu sehen (**Bild 63**).

8.2. Mechanische Eigenschaften

8.2.1. Zugfestigkeit und 0,2 % – Dehngrenze

Die Zugfestigkeit und 0,2 % - Dehngrenze sind beim Vollformgießverfahren und Sandgießverfahren gleich hoch. Beim Kokillengießverfahren sind sie, wie es auch wegen der größeren Erstarrungsgeschwindigkeiten und demzufolge feinkörnigem Gefüge zu erwarten war, höher als bei den anderen Verfahren (**Bild 64**).



Bild 64: Vergleich der Festigkeitswerte in Abhängigkeit vom Gießverfahren

8.2.2. Bruchdehnung

Die Bruchdehnungswerte der Vollformgussteile fallen wegen erhöhter Porosität niedriger aus als die der Sandgussteile und Kokillengussteile (**Bild 65**). Die Proben waren teilweise sehr spröde und rissen beim Zugversuch vorzeitig.

Bruchdehnungswerte



Bild 65: Vergleich der Bruchdehnungswerte in Abhängigkeit von Gießverfahren



fallendes Gießen mit Disopast 6369/10

Bild 66: Vergleich der Festigkeitswerte in Abhängigkeit von der Geometrie

Die Festigkeitswerte unterscheiden sich von Stab zu Stab nur unbedeutend (**Bild 66**). Die Geometrie der Stäbe hinsichtlich der Wanddicken, die eine wesentliche Rolle spielen würde,

ist fast gleich. Die Streuung der Bruchdehnungswerte ist auf das Vorhandensein der Poren in den Zugprobestäben zu erklären (**Bild 67**).



fallendes Gießen mit Disopast 6369/10

Bild 67: Vergleich der Bruchdehnungswerte in Abhängigkeit von der Geometrie

8.2.3. Härte

Die Brinellhärte in den Stäben lässt keine Abhängigkeit erkennen (**Bild 68**). Offensichtlich beeinträchtigt die Porosität die Messung.

fallendes Gießen mit Disopast 6369/10



Bild 68: Härtewerte in den einzelnen Stäben



Härtewerte

Bild 69: Vergleich der Härtewerte

Insgesamt erfüllt das Gesamtbild die Erwartungen. Die Härtewerte von den fallend mit Disopast 5000 gegossenen Gussteilen sind niedriger als die von den fallend mit Disopast 6369/10 gegossenen Gussteilen, d. h. die Härte verhält sich proportional zur Porosität.

Die Härtewerte der beim Vollformgießen hergestellten Gussteile liegen mit HB 90 nur geringfügig unter denen beim Sandguss mit HB 93 (**Bild 69**).

8.3. Porosität

Eine Erhöhung der Porosität bei Verringerung der Formfüllgeschwindigkeit legt die Vermutung nahe, dass durch die Entstehung eines Gasspaltes die gasförmigen Zersetzungsprodukte in der Schmelze eingeschlossen werden.

Die mit Hilfe der Schliffe gewonnenen Erkenntnisse beruhen auf Aufnahmen einer Oberfläche. Daher ist eine Übertragung dieser Werte auf das Gesamtvolumen der Probe nur bedingt zulässig.

Das **Bild 70** stellt eine Aneinanderreihung von Probenoberflächen dar, die jeweils im Abstand von 30 mm aufgenommen wurden.

Visuell betrachtet, stimmt die Porenverteilung mit den oben bewerteten Porositätswerten überein. Die meisten und größten Poren sind auf den Schliffbildern beim fallenden Gießen ohne Schlichte zu sehen. An zweiter Stelle steht das fallende Gießen mit der Schlichte Disopast 5000 und 0,8 mm Schichtdicke, gefolgt von dem fallenden Abguss mit der Schlichte Disopast 6369/10. Die geringste Anzahl von Poren weisen die Bilder beim fallenden Gießen mit Disopast 5000 mit der 0,2 mm dünnen Schicht und beim steigenden Gießen mit Disopast 5000 mit der 0,2 mm dünnen Schicht, Unterdruck und Entgasung auf.



Bild 70: Porenausbildung bei verschiedenen Versuchsvarianten:

- a) fallendes Gießen ohne Schlichte, mit Unterdruck;
- b) fallendes Gießen mit Disopast 5000, 0.8 mm Schlichteschicht
- c) fallendes Gießen mit Disopast 5000, 0,2 mm Schlichteschicht
- d) fallendes Gießen mit Disopast 6369/10, 0,2 mm Schlichteschicht;
- e) steigendes Gießen mit Disopast 5000, 0,8 mm Schlichteschicht, Unterdruck und Entgasung;
- f) steigendes Gießen mit Disopast 6369/10, 0,2 mm Schlichteschicht,
- **Unterdruck und Entgasung**

Die Poren beim fallenden Gießen sind überwiegend rund. Es wurde beobachtet, dass beim steigenden Guss die Poren einen eher länglichen und eckigen Querschnitt aufwiesen (**Bild 71**, **Bild 72**).



Bild 71: Porosität beim fallenden Gießen ohne Schlichte und mit Unterdruck



Bild 72: Porosität beim steigenden Gießen mit Disopast 6369/10, Unterdruck und Entgasung

Das **Bild 73 z**eigt ein Beispiel der Porenverteilung auf der Oberfläche der im Abstand von 30 mm entnommenen Proben. Dies ist die Darstellung der Porosität, die durch den Porenflächenanteil auf der Oberfläche nach der Bildbearbeitungssoftware "Image C" berechnet wurde.

Bei einer genaueren Betrachtung der Poren wurden ihre Flächen und Durchmesser gemessen und ihre Anzahl ermittelt (**Bild 74**). Die meisten hatten einen runden Querschnitt mit einem Durchmesser kleiner als 1 μ m. Einzelne Poren hatten eine Querschnittsfläche von 65 μ m². Es ist anzunehmen, dass derart große Poren aus flüssigen Reaktionsprodukten stammen, die durch die Schmelze aufgenommen und in ihr weiter zersetzt worden sind.

fallendes Gießen ohne Schlichte und mit Unterdruck



Bild 73: Porositätsverteilung in linearer Darstellung



fallendes Gießen mit Disopast 6369/10

Bild 74: Verteilung der Porenflächen im Stab 1 im Abstand von je 30 mm

fallendes Gießen mit Disopast 6369/10



Bild 75: Verteilung der Porendurchmesser im Stab 1 mit Abstand von je 30 mm

Auf dem **Bild 75** sind die Poren als ideal rund dargestellt. Die Durchmesser der Poren entsprechen den gezeigten Kreisen.

9. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die durch die Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse erlauben es, einige zusammenfassende Vorschläge und Schlussfolgerungen mitzuteilen, die auf eine Verbesserung der Gussstückqualität und Herstellung fehlerfreier und zuverlässiger Gussteile nach dem Vollformgießverfahren gerichtet sind.

Durch die Untersuchungen wurde die Porosität bei vorgegebenen Formfüllgeschwindigkeiten unter gegebenen experimentellen Bedingungen bestimmt.

Beim fallenden Vollformguss mit Aluminiumlegierungen existiert wegen der vergleichsweise zu Gusseisen niedrigen Gießtemperatur, nahezu kein Gasspalt zwischen der Schmelze und dem Schaumstoffmodell.

Durch die Variierung der Schmelzezufuhr konnten Vorteile des fallenden Vollformgießens gegenüber dem steigenden Vollformgießen verdeutlicht werden. Außer wirtschaftlichen Vorteilen erfordert das fallende Gießen deutlich geringere Formfüllzeiten, die sehr wichtig bei der Herstellung von Seriengussteilen sind.

Die Gussteilporosität übersteigt die beim steigenden Gießen nicht. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Porositäten bei den beiden Gießmethoden nahezu identisch sind.

Eine steigende Tendenz der Porenhäufigkeit besteht proportional zur Formfüllhöhe. Auch die Verteilung der Poren in den Gussstücken ist ähnlich.

Der Einfluss des Unterdrucks auf die Formfüllgeschwindigkeit und die Porosität ist erkennbar. Die durchgeführten Versuche haben allerdings deutlich gezeigt, dass der Wirkungsgrad des Unterdrucks stark von der Gasdurchlässigkeit der Schlichte abhängig ist. Der Einsatz des Unterdrucks ist auch nur dann effektiv, wenn sich zwischen der Schmelze und dem Schaumstoffmodell ein Gasspalt ausbildet und die Zersetzungsprodukte anschließend in den Sand abgesaugt werden.

Die Schlichten Disopast 5000 und Disopast 6369/10 mit den verschiedenen Schichtdicken verhielten sich unterschiedlich. Bei den ungeschlichteten Modellen war eine fallende Tendenz

der Porositätsverteilung vom oberen Teil des Stabes nach unten zu beobachten, während sich diese Tendenz bei allen anderen Versuchen steigend darstellt.

Eine Abhängigkeit der Porosität von der Schichtdicke der Schlichte wurde nachgewiesen.

Die Gussteile von Schaumstoffmodellen mit der 0,8 mm Schlichteschicht weisen zwar geringere Porositätswerte als die Gussteile ungeschlichteter Modelle auf, liegen aber damit oberhalb der Porositätswerte bei der Verwendung von Schlichten mit 0,2 mm Schichtdicke. Geringere Porosität bei der Verwendung von Disopast 6369/10 gegenüber der Schlichte Disopast 5000 ist auf höhere Gasdurchlässigkeit und dadurch hervorgerufene turbulente Formfüllung zurückzuführen.

Die Formfüllgeschwindigkeit bei den Versuchen mit 0,2 mm Schlichteschicht und Disopast 5000 war ein wenig höher als bei den ungeschlichteten Modellen. Bei diesen kam es zur Penetration der Schmelze in den Sand, was zur Verringerung der Gasdurchlässigkeit führte. Die Folge ist eine sehr hohe Porosität im Gusstück.

Die Notwendigkeit des Einsatzes der Spülgasbehandlung zur Verbesserung der Porosität und demzufolge Erhöhung der mechanischen Eigenschaften der Gussteile wurde bewiesen. Bei der Versuchsreihe mit Entgasung, kombiniert mit dem Unterdruck, konnten sehr niedrige Porositätswerte erzielt werden. Die Argonspülung unmittelbar vor dem Gießen beeinflusst auch die Formfüllgeschwindigkeit positiv.

Durch die mikroskopischen Untersuchungen konnten die Poren visualisiert und die zweidimensionalen Größen, wie Fläche, Durchmesser sowie minimale und maximale Querschnitte gemessen werden.

Die Form der Poren unterschied sich bei den Gießvarianten. Beim fallenden Guss waren sie überwiegend rund, beim steigenden Guss – eher länglich und eckig.

Das am GIESSEREI-INSTITUT praktizierte Messverfahren, den Formfüllvorgang mit Hilfe von Widerstandsdraht zu verfolgen, verlief erfolgreich und gab ein lückenloses Bild der Formfüllung wieder. Die bearbeiteten Werte wurden in Diagrammen dargestellt. Mit Hilfe der Messergebnisse, kann der gesamte Prozess des Zersetzungsablaufs der Schaumstoffmodelle während der Formfüllung in drei Hauptphasen eingeteilt werden:

- In der ersten Phase gelangt die Schmelze vom Gießtiegel in den Einguss und drängt mit hoher Geschwindigkeit in das Schaumstoffmodell hinein.
- Nach wenigen Sekunden wird die Schmelze gebremst und kommt sogar zum Stillstand. Dies wird als zweite Phase betrachtet.
- Die dritte Phase ähnelt der Ersten. Ist der weitere Weg nach der Abführung von Zersetzungsprodukten wieder frei, fließt die Schmelze weiter hinunter. Die Füllgeschwindigkeit steigt rasch.

Abhängig von vielen Einflussfaktoren wie z. B. Geometrie des Gussteils, Gasdurchlässigkeit des Systems und Dichte des Schaumstoffmodells, kann der oben beschriebene Vorgang als ein Teil der drei beschriebenen Phasen ablaufen oder auch als Gesamtvorgang mehrmals.

Die Möglichkeit der Verringerung von Porosität in den Gussteilen durch Vibration während der Erstarrung auch bei der Fertigung von Vollformgussteilen sollte in weitere Überlegungen einbezogen werden. Bei optimierter Frequenz und Amplitude der Vibratoren werden die empfindlichen Schaumstoffmodelle nicht deformiert. Es könnten dabei die Erkenntnisse verwendet werden, die auch beim Vibrieren während der Verdichtung des Sandes eine Rolle spielen. Der Schwingungseintrag ist unter Berücksichtigung der Konstruktion des Gussteils und der Lage im Formkasten auszuwählen.

Ein luftdichter Abschluss des Formkastens für das Vollformgießen könnte die Nutzung eines Unterdrucks beim Gießen noch effektiver gestalten. Das würde dem Einziehen von Falschluft aus der offenen Oberfläche des Formkastens während der Absaugung vorbeugen.

Die Ergebnisse der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen können lediglich einen Beitrag zur Vervollständigung der Kenntnis über das Vollformgießverfahren leisten. Diese Versuche wurden ausschließlich unter Laborbedingungen durchgeführt.

Um die gewonnenen Ergebnisse in der Praxis nutzen zu können, müssen weitere Untersuchungen an realen Gusssortimenten durchgeführt werden.

Bilderverzeichnis

Bild 1: Gießverfahren nach DIN 8580 [2]	2
Bild 2: Schematische Darstellung des Fertigungsprozesses [9]	4
Bild 3: Schematische Darstellung des Niederdruck-Vollformgießverfahrens [18]	7
Bild 4: a). "Near Net Shape" – Fähigkeit bei unterschiedlichen Gießverfahren [17]	
b). Gusstoleranzen bei unterschiedlichen Gießverfahren [17]	9
Bild 5: Schaumstoffmodellwerkstoffe [20]	14
Bild 6: EPS-Modellherstellung nach dem Vakuumverfahren [26]	16
Bild 7: Luftblase bei unsachgemäßer Vibration [48]	19
Bild 8: Wasserstofflöslichkeit in Aluminium [54]	23
Bild 9: Schematische Darstellung der Modellzersetzung bei der Formfüllung	26
Bild 10: Zersetzungsprodukte eines Schaumstoffes unter	
Gleichgewichtsbedingungen [60]	28
Bild 11: Zersetzung des EPS-Modells (EPS – expandierbares Polystyrol) [61]	28
Bild 12: Zusammenhänge zwischen Schaumstoffmodelleigenschaften und	
Gussteilqualität [64]	30
Bild 13: Einfluss der Schaumstoffmodelldichte auf Mikro- und Makroporosität [64]	31
Bild 14: Zunehmende Modellverschweißung lässt die Mikroporosität nur gering	
ansteigen, die Makroporosität – sehr [64]	33
Bild 15: Einfluss der Klebstoffmenge auf die Porosität bei unterschiedlichen	
Klebemechanismen [66]	34
Bild 16: Variation der Einflussfaktoren	38
Bild 17: Konstante Versuchsparameter	39
Bild 18: Prinzipschaltbild der Formfüllungsmessung beim Vollformgießen	40
Bild 19: Zusammensetzung der Schmelze (VW - Betriebsnorm Volkswagen AG,	
VG – Vollformguss, SG – Sandguss, KG – Kokillenguss)	41
Bild 20: Anordnung der Thermoelemente bei der DIA/DAGO-Datenerfassung	42
Bild 21: Temperaturverlauf gemessen mit der Software DIA/DAGO	43
Bild 22: Temperaturverlauf zwischen 0 und 40 sec nach Gießbeginn. Software	
DIA/DAGO	43
Bild 23: Temperaturverlauf zwischen 0 und 15 sec. nach Gießbeginn. Software	
WorkBench	44
Bild 24: Beispiel des Formfüllvorgangs. Software WorkBench	45
Bild 25: Beispiel des Temperaturverlaufs an Stäben von 1000 mm Länge	46

Bild 26: Beispiel des Temperaturverlaufs zwischen 0 und 10 sec an Stäben mit 1000	
mm Länge	46
Bild 27: Anordnung der Thermoelemente bei der WorkBench-Messaufnahme. Die	
roten Punkte auf dem Bild sind die Messstellen	47
Bild 28: Steigende Formfüllung an Stäben mit und ohne Schaumstoffmodell von	
1000 mm Länge mit verschiedenen Querläufen:	
S-S_1 ohne Modell mit 30 mm Durchmesser Querlauf,	
S-S_2 ohne Modell mit 20 mm Durchmesser Querlauf,	
V-S mit Modell mit 30 mm Durchmesser Querlauf	48
Bild 29: Modelleinrichtung für Sandguss	49
Bild 30: Stabkokille	50
Bild 31: Schaumstoffmodell für Zugstäbe	52
Bild 32: Messstellen am Schaumstoffmodell: Punkte - Thermoelemente,	
Linien - Widerstandsdraht	53
Bild 33: Schematische Darstellung vom Versuchsaufbau	53
Bild 34: Vibrationstisch mit dem Formkasten	54
Bild 35: Gussfehler an Proben beim Vollformgießverfahren (Vorversuche)	
a) Penetration; b) Kaltschweiße; c) Abdruck der EPS-Perlen; d) Gasblase	55
Bild 36: Reihenfolge der Probenentnahme im Abstand von 30 mm bei fallendem und	
steigendem Gießen	56
Bild 37: Schleifflächen der Proben	57
Bild 38: Versuchsstand zur Dichtebestimmung	57
Bild 39: Formfüllzeit bei unterschiedlicher Gießart	60
Bild 40: Formfüllgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Gießart	61
Bild 41: Korrigierte Formfüllzeit bei unterschiedlicher Gießart	62
Bild 42: Korrigierte Formfüllgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Gießart	62
Bild 43: Porositätsverteilung in Abhängigkeit von der Gießart	63
Bild 44: Einfluss der Schlichte auf die Formfüllzeit	65
Bild 45: Einfluss der Schlichte auf die Formfüllgeschwindigkeit	65
Bild 46: Einfluss der Schlichte auf die Porositätsverteilung	66
Bild 47: Formfüllzeit in Abhängigkeit vom Unterdruck	67
Bild 48: Einfluss von Unterdruck auf die Formfüllgeschwindigkeit	68
Bild 49: Einfluss des Unterdrucks auf die Porositätsverteilung beim steigenden	
Gießen	68
Bild 50: Einfluss von Unterdruck auf die Porositätsverteilung (Disopast 6369/10)	69

Bild 51: Einfluss der Schmelzebehandlung auf die Formfüllzeit	. 70		
Bild 52: Einfluss der Schmelzebehandlung auf die Formfüllgeschwindigkeit			
Bild 53: Einfluss einer Schmelzebehandlung auf die Porositätsverteilung			
Bild 54: Visualisierung des Formfüllvorgangs beim fallenden Gießen	. 73		
Bild 55: Formfüllung ohne Gasspalt zwischen Schmelze und Schaumstoffmodell			
beim fallenden Guss	. 74		
Bild 56: Formfüllungsverlauf und Füllgeschwindigkeit	. 75		
Bild 57: Visualisierung der Zersetzung des Schaumstoffmodells beim fallenden Guss	. 76		
Bild 58: Formfüllung und Geschwindigkeitsverlauf am Beispiel vom			
Stab Nr. 3 (Bild 31)	. 76		
Bild 59: Übergang der Zersetzungsprodukte durch Kanäle in der Schlichte	. 77		
Bild 60: Verhalten von Zersetzungsprodukten im Sand	. 78		
Bild 61: Temperaturverlauf in oberen und unteren Messstellen	. 79		
Bild 62: Makrogefüge von G-AlSi6Cu4	. 80		
Bild 63: Mikrogefüge von G-AlSi6Cu4	. 80		
Bild 64: Vergleich der Festigkeitswerte in Abhängigkeit vom Gießverfahren	. 81		
Bild 65: Vergleich der Bruchdehnungswerte in Abhängigkeit von Gießverfahren	. 82		
Bild 66: Vergleich der Festigkeitswerte in Abhängigkeit von der Geometrie	. 82		
Bild 67: Vergleich der Bruchdehnungswerte in Abhängigkeit von der Geometrie	. 83		
Bild 68: Härtewerte in den einzelnen Stäben	. 84		
Bild 69: Vergleich der Härtewerte	. 84		
Bild 70: Porenausbildung bei verschiedenen Versuchsvarianten:			
a) fallendes Gießen ohne Schlichte, mit Unterdruck;			
b) fallendes Gießen mit Disopast 5000, 0.8 mm Schlichteschicht			
c) fallendes Gießen mit Disopast 5000, 0,2 mm Schlichteschicht			
d) fallendes Gießen mit Disopast 6369/10, 0,2 mm Schlichteschicht;			
e) steigendes Gießen mit Disopast 5000, 0,8 mm Schlichteschicht,			
Unterdruck und Entgasung;			
f) steigendes Gießen mit Disopast 6369/10, 0,2 mm Schlichteschicht,			
Unterdruck und Entgasung	. 86		
Bild 71: Porosität beim fallenden Gießen ohne Schlichte und mit Unterdruck	. 87		
Bild 72: Porosität beim steigenden Gießen mit Disopast 6369/10, Unterdruck und			
Entgasung	. 87		
Bild 73: Porositätsverteilung in linearer Darstellung	. 88		
Bild 74: Verteilung der Porenflächen im Stab 1 im Abstand von je 30 mm	. 88		

Literaturverzeichnis

- [1] Fahrig, M.: Tagungsband "Lost Foam 2000"; Paderborn 2000, S. 11-25
- [2] Norm DIN 8580, 06.74, Fertigungsverfahren
- [3] Shroyer, H.-F: US-Patent Nr. 2830343, 15.04.1958
- [4] Nellen, H.: DBP 1203390, 07.07.1960
- [5] Smith, T. R.: US-Patent 3157924, 24.11.1964
- [6] Krzyzanowski, E.: DBP Nr. 1 301 440, 03.02.1968 und Nr. 1 758 521, 19.01.1968
- [7] Hofmann, R.: DBP Nr. 1 301 439, 11.11.1966
- [8] Wittmoser, A.; Hofmann, R.: 35. Internat. Gießerei-Kongress, Vortrag 2, Kyoto, Japan, 1968
- [9] Standke, W.: Gießerei 74 (1987) Nr. 1, S. 4-12
- [10] Bast, J., Wenig, R.: Gießerei 81 (1994) Nr. 22, S. 797-802
- [11] Cossé, F.; Garat, M.; Guy, S.; Perrier, J.J.; Thomas, J.: Gießerei-Rundschau 38 (1991) Nr. 11/12, S. 5-13
- [12] Breuer, N.; Garat, M.: AFS-Kongress, Vortrag 12, Birmingham, Alabama, USA, 1993
- [13] Brown, J.R.: Foundry Practice, Nr. 205, 1982, S. 3-5
- [14] Ashton, M.C.; Sharman, S.G.; Brookes, A.J.: Transactions of the American Foundrymen's Society 88, 1984, S. 271-280
- [15] Easwaran, J.: AFS-Kongress, Vortrag 14, Birmingham, Alabama, USA, 1993
- [16] Shinskij, O. I.: RF-Patent 2020040, 1994 Nr. 18
- [17] Klooß, F.: Studienarbeit, TU Bergakademie Freiberg 1996
- [18] Lippek, P.: "Entwicklung und Erprobung einer Niederdruck-Gießeinrichtung für Eisen-Kohlenstoff-Legierungen und Untersuchungen zur gesteuerten Formfüllung" Dissertation; TU Bergakademie Freiberg 2001
- [19] Crmak, K.: Indian Foundry Journal, Band 37 (1991) Heft 5 S. 19 22
- [20] HÜTTENES-ALBERTUS -Informationsdienst: Lost Foam Verfahren 1, Juni 1994
- [21] Schneider, W.: Ingenieur-Werkstoffe 3 (1991) Nr. 4, S. 13-19
- [22] Bolle, J.: Gießerei 80 (1993) Nr. 2, S. 46-50
- [23] Goria, C. A.: Konferenz-Einzelbericht: Energy Efficiency in the Foundry Sector; Proceedings European Seminar, San Sebastian, Spanien (1991), S. 59-70
- [24] Michallik, U.: "Lostfoam 2000"; VDG, Paderborn 2000, S. 27-34

- [25] Martinez, O. M.: Transactions of the American Foundrymen's Society 98 (1990), S. 241-244
- [26] Schaarschmidt, E.: Gießerei-Rundschau 35 (1988), S. 13-20
- [27] Spiess, H.: Das Vollformgießen in der praktischen Anwendung der Eisengießerei, Tagungsband "Vollformgießen im binderfreien Sand"; VDG Düsseldorf 1994
- [28] Tseng, C.: Transactions of the American Foundrymen's Society 100 (1992), S.519-527
- [29] Graham, N. K.: Transactions of the American Foundrymen's Society 98 (1990), S. 565-572
- [30] Kirgin, K. H.: Modern Casting 85 (1995) Nr. 1, S. 23-26
- [31] McMellon, B.: Foundry Management & Technology 118 (1990) Nr.12, S. 19
- [32] Raczek St.: Gießerei 81 (1994) Nr. 11, S. 324-328
- [33] Hetke, A.: Foundry Managm.&Technology 1994 10, S. 22-25
- [34] Kuhlgatz, C.: Stand der Technik des Vollformgießens (AFS-Kongress), Tagungsband "Vollformgießen im binderfreiem Sand"; VDG Düsseldorf 1994
- [35] Kniese, B.: Foundry Trade Journal 168 (1994) 3499, S. 469- 470
- [36] Brown, J. R.: The Foundryman 87 (1994) Nr. 6, S. 223-231
- [37] Vereinigung Deutscher Schmelzhütten Aluminium-Gusslegierungen; VDS Düsseldorf, 1988
- [38] Kuhlgatz, C.: Gießerei 81 (1994) Nr. 22, S. 803-808
- [39] Fahrig, H.-M.: "Einfluss gießtechnischer Randbedingungen auf Porosität und Festigkeit von Aluminiumwerkstücken beim Vollformgießen" Dissertation; Universität-GH Paderborn 1997
- [40] Kowalke, H.: "Zur thermischen Auflösung verlorener Polystyrolschaumstoffmodelle beim Vollformgießen von Seriengussteilen"; Dissertation, TH Darmstadt 1980
- [41] Busse, M.: " Einfluss der Formteilherstellung auf Qualitätsmerkmale bei Aluminium-Werkstücken beim Vollformgießen" Dissertation; Universität-GH Paderborn, 1992
- [42] Eymann, J.: " Beitrag zum Vollformgießen von Aluminium in binderfreiem Sand" Dissertation; TU Clausthal 1997
- [43] Homan, D.: Schaumstoff-Kunststoffe Ein Überblick über Herstellung und Anwendungsmöglichkeiten, Beurteilung der Eigenschaften; Carl Hanser Verlag, München 1966

- [44] Stepanov, A.: "Herstellung von Gussstücken nach vergasbaren Modellen"; Maschinostroenie, Moskau 1976 (Russisch)
- [45] Monroe, R. W.: "Expandable Pattern Casting"; ASF-Inc., USA 1992
- [46] Walter, C.; Siefer, W.: Gießerei 82 (1995) Nr. 3, S. 91-95
- [47] Seeger, K.: "Vollformgießen im binderfreien Sand"; VDG, Düsseldorf 1994
- [48] Quack, U.: Stand der Technik des Vollformgießens von Serienteilen; Gießereitechnik aktuell, Band 4, Gießerei-Verlag, Düsseldorf 1988
- [49] Nikolov, K.: "Beitrag zum Formherstellung durch Vibrationsverdichtung beim Vollformgießen" Dissertation; TU Bergakademie Freiberg 1996
- [50] Sacharuk, L.: "Transport- und Verdichtungsprozesse des Sandes beim Vollformgießen" Dissertation; TU Bergakademie Freiberg 2001
- [51] Kammer, C.: "Aluminium-Taschenbuch"; Band 1, Aluminium-Verlag Düsseldorf, 1995
- [52] Drossel, G.: "Bewertung von Aluminium-Silizium-Kupferlegierungen";Dissertation, TU Bergakademie Freiberg 1989
- [53] Makarow, G. S.: "Reinigung von Aluminiumlegierungen mit Gasen"; Metallurgia-Verlag, Moskau 1983 (Russisch)
- [54] Bruch, E. u.a.: "Aluminium Gusslegierungen"; Woeste Druck + Verlag GmbH & Co KG, Essen, 1988
- [55] Altenpohl, D.: "Aluminium von innen"; Alumin.-Verlag, Düsseldorf,1994
- [56] Müller, H.-J.: Handbuch der Schmelz- und Legierungspraxis für Leichtmetalle;Fachverlag Schiele & Schön, Berlin, 1977
- [57] Klinkenberg, F.-J.: "Wasserstoff und Porosität in Aluminium" Dissertation; RWTH Aachen 1998
- [58] Lehnert, W.; Drossel, G.; Liesenberg, O.: "Aluminium-Taschenbuch"; Band 2, Aluminium-Verlag; Düsseldorf, 1996
- [59] Goria, C. A.; Serramoglia, G.: AFS-Transactions, Band 94 1986; S. 589 600
- [60] Kobzar, A.I.; Ivanyuk, E.G.: Russian Castings Production, July 1975, S. 302-303
- [61] Sun, Y.; Askeland, D.R.: AFS-Transactions, Band 100 1992; S. 92 167
- [62] Walter, C.; Siefer, W.: Gießerei 82 (1995) Nr. 2, S. 62-66
- [63] Walter, C.; Siefer, W.: Gießerei 82 (1995) Nr. 4, S. 116-120
- [64] Busse, M.; Budde, L.: Gießerei 79 (1992) Nr. 17, S. 131-139
- [65] Walter, C.; Siefer, W.: Gießerei 82 (1995) Nr. 6, S. 185-189
- [66] Fahrig, H.-M.; Busse, M.; Hahn, O.: Gießerei 82 (1995) Nr. 24, S. 900-905

 [67] Lang, L.: "Entwicklung und Erprobung einer Niederdruck-Vollform-Gießeinrichtung und Verfahrensuntersuchungen" Dissertation; TU Bergakademie Freiberg 1999

Anlagen

Anlage 1. Messergebnisse am Beispiel beim fallenden Gießen ohne Schlichte und mit Unterdruck

Widerstandsmessung am	Füllhöhe, ermittelt von der	Darstellung der Messergebnisse
Probekörper	Widerstandsmessung	
T Stab1 Stab2 Stab3 Stab4	T Stab1 Stab2 Stab3 Stab4	Stab1 Stab2 Stab3 Stab4
0 8,054 8,054 8,054 8,054 0.05 8.054 3,887 3,909 8,054		8
0,1 8,046 3,867 3,909 8,054	0,1 0 1,136 0 0	7 -
0,15 8,054 3,834 3,874 8,052	0,15 0 9,164 0 0	6 -
0,2 8,046 3,796 3,874 8,052	0,2 0 18,25 0 0	р _в 5 -
0,3 8,046 3,694 3,832 8,052	0,3 0 41,85 0 0	
0,35 8,054 3,666 3,783 8,05	0,35 0 48,14 6,323 0	<u>р</u> 3
0,4 8,046 3,653 3,783 8,05 0.45 8,046 3,644 3,782 8,05	0,4 0 51,03 6,323 0 0,45 0 53,02 6,558 0	2
0,5 8,046 3,617 3,782 8,05	0,5 0 58,94 6,558 0	1
0,55 8,046 3,586 3,776 8,05	0,55 0 65,65 7,969 0	
0,6 8,046 3,556 3,776 8,05	0,6 0 72,06 7,969 0	0 0,5 1 1,5 2 2,5 3 3,5 4 Zeit (s)
0,7 8,046 3,496 3,745 8,05	0,7 0 84,61 15,19 0	201 (0)
0,75 8,046 3,446 3,723 8,047	0,75 0 94,82 20,26 0	Widerstandsmessung am Probekörper
0.8 4,12 3,38 3,723 8,047	0,8 0 108 20,26 0	
0,9 3,911 3,257 3,707 8,008	0,9 0 131,5 23,91 0	
0,95 3,882 3,207 3,629 8,008	0,95 6,445 140,7 41,32 0	
1 3,877 3,177 3,629 8,008	1 7,678 146,1 41,32 0 1.05 13.56 149.4 43.07 0	0
1,1 3,819 3,148 3,621 8,006	1,1 21,77 151,3 43,07 0	50
1,15 3,824 3,107 3,595 8,003	1,15 20,57 158,5 48,71 0	Ê 100
1,2 3,777 3,046 3,595 8,003	1,2 $31,73$ $169,1$ $48,71$ 01.25 34.08 183.5 58.96 0	E 150
1,3 3,735 2,906 3,547 8,003	1,3 41,5 192,3 58,96 0	
1,36 3,689 2,875 3,521 8,001	1,36 51,98 197,3 64,42 0	
1,4 3,675 2,827 3,521 8,001	1,4 55,13 204,9 64,42 0 1.45 64 209,5 73.93 0	300
1,5 3,586 2,733 3,475 3,934	1,5 74,65 219,3 73,93 0	250
1,55 3,556 2,692 3,421 3,906	1,55 81,06 225,5 84,84 0	
1,6 3,53 2,636 3,421 3,906 1.65 3,483 2,562 3,382 3,888	1,6 86,54 233,7 84,84 0 1,65 96,29 244,3 92,57 0	Zeit (s)
1,7 3,458 2,562 3,382 3,888	1,7 101,4 244,3 92,57 0	
1,75 3,433 2,505 3,325 3,852	1,75 106,4 252,3 103,6 0	Fullhone ermittelt von der Widerstandsmessung
1,6 3,396 2,493 3,325 3,652 1,85 3,344 2,395 3,289 3,803	1,8 113,8 254 103,8 0	
1,9 3,308 2,388 3,289 3,803	1,9 130,9 268,2 110,5 6,59	
1,95 3,269 2,342 3,241 3,786 2 3,211 2,346 3,241 3,786	1,95 138,2 274,3 119,4 10,62 2 149 273,8 119,4 10,62	3
2,05 3,189 2,301 3,128 3,738	2,05 153 279,6 139,9 21,81	
2,1 3,177 2,294 3,128 3,738	2,1 155,1 280,5 139,9 21,81	2,5
2,15 3,159 2,288 3,003 3,716	2,15 158,4 281,3 161,4 26,86 2,2 166,3 286,9 161,4 26,86	
2,25 3,06 2,144 3,004 3,668	2,25 175,7 299,3 161,2 37,69	
2,3 2,992 2,085 3,004 3,668	2,3 187,2 306,4 161,2 37,69	<u>8</u> 1,5
2,35 2,978 2,034 2,871 3,587 2,4 2,928 2,001 2,871 3,587	2,35 189,5 312,5 182,9 55,44 2,4 197,8 316,4 182,9 55,44	
2,45 2,915 1,978 2,847 3,457	2,45 199,9 319 186,7 82,6	
2,5 2,809 1,926 2,847 3,457	2,5 216,7 325 186,7 82,6	0,5
2,55 2,729 1,882 2,781 3,381 2,6 2,652 1,86 2,781 3,381	2,55 228,9 329,9 197 97,77 2,6 240,4 332,4 197 97,77	
2,65 2,608 1,857 2,725 3,227	2,65 246,8 332,7 205,5 127	Stab1 Stab2 Stab3 Stab4
2,7 2,512 1,852 2,725 3,227	2,7 260,4 333,3 205,5 127	Füllzeit der einzelnen Stähe
2,75 2,486 1,825 2,685 3,052 2,8 2,388 1.82 2.685 3.052	2,75 264 336,3 211,5 158,1 2,8 277.2 336.8 211.5 158.1	r unzen der emzemen Stabe
2,85 2,144 1,796 1,998 2,848	2,85 308,3 339,4 301,7 191,6	
2,9 2,058 1,783 1,998 2,848	2,9 318,7 301,7 191,6	
2,95 2,007 1,78 1,849 2,728 3 1,926 1,749 1,849 2,728	2,95 324,7 318,6 210,1 3 334 318,6 210,1	180
3,05 1,876 1,729 1,828 2,629	3,05 339,6 320,9 224,7	َ دُوْ 160
3,1 1,865 1,711 1,828 2,629	3,1 320,9 224,7 2,45 220,4 251,4	٤ 140
3,13 1,000 1,700 1,000 2,439	3,10 338,4 251,4 3,2 251.4	
3,25 1,868 1,691 1,66 2,204	3,25 281,9	응 100
3,3 1,857 1,681 1,66 2,204	3,3 281,9 3,35 205 1	
3,4 1,852 1,662 1,659 2,012	3,4 305,1 3,4 305.1	5 60 6 1
3,45 1,846 1,657 1,655 1,845	3,45 324,1	
3,5 1,844 1,652 1,655 1,845	3,5 324,1	
3,55 1,827 3,6 1,812 1,642 1,655 1,827	3,6 326 3,6 326	Of Stable Stable Stable Stable
1,804 1,64 1,654 1,698	3,65 339,9	Stad Stad Stad Stad Stad Stad Stad Stad
		Füllgeschwindigkeit, berechnet von der Füllzeit

Anlage 2. Messergebnisse am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 6369/10

Anlage 3. Messergebnisse am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 5000 (0,8 Schichtdicke)
Anlage 4. Messergebnisse am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 5000 (0,2 Schichtdicke) und

Unterdruck

Widerstandsmessung am Füllhöhe, ermittelt von der					F	üllhöhe, ermittelt von der	Darstellung der Messergebnisse			
	Pro	obeköi	per			Widerstandsmessung				
Т	Stab1	Stab2	Stab3	Stab4	Т	Stab1 Stab2 Stab3 Stab4	- Stab1 - Stab2 - Stab3 - Stab4			
0	7,96	7,96	7,96	7,965	0	0 0 0 0	8			
0,05	7,90	3,755	4,034 3.926	7,903	0,05	0 52,224 1.1206 0	7 -			
0,15	7,952	3,582	3,926	7,958	0,15	0 71,019 1,1206 0	6			
0,2	7,952	3,552	3,349	7,955	0,2	0 77,481 130,02 0	ğ 5 -			
0,25	7,952	3,509	3,349	7,955 7 953	0,25	0 86,592 130,02 0				
0,35	7,944	3,434	3,327	7,953	0,35	0 102,07 134,3 0				
0,4	7,952	3,381	3,212	7,953	0,4	0 112,71 156,06 0				
0,45	7,944	3,329	3,212	7,953	0,45	0 122,91 156,06 0	1			
0,5	7,952 7 944	3,293	3,084	7,95 7 95	0,5 0.55	0 129,84 179,07 0	0 +			
0,6	7,944	3,201	3,037	7,95	0,6	0 147,08 187,23 0	0 0,5 1 1,5 2 2,5 3 3,5 4			
0,65	7,944	3,156	3,037	7,95	0,65	0 155,28 187,23 0	Zeit (s)			
0,7	7,952	3,109	3,02	7,948	0,7	0 163,67 190,14 0	Widerstandsmessung am Probekörper			
0,75	7,944	2.99	3,02 2.872	7,946	0,75	0 184.23 214.67 0				
0,85	7,944	2,922	2,872	7,946	0,85	0 195,54 214,67 0				
0,9	7,936	2,842	2,78	7,946	0,9	0 208,47 229,22 0	Stab1 — Stab2 — Stab3 — Stab4			
0,95	7,944	2,778	2,78	7,946 7 943	0,95 1	0 218,53 229,22 0				
1,05	7,936	2,675	2,666	7,943	1,05	0 234,21 246,55 0				
1,1	4,041	2,635	2,613	7,915	1,1	0 240,13 254,36 0				
1,15	3,877	2,572	2,613	7,915	1,15	38,468 249,29 254,36 0				
1,2	3,739	2,523	2,373	7,91 7.01	1,2	71,718 256,27 287,87 0				
1,23	3,587	2,403	2,126	4,129	1,23	105,93 270,13 319,5 0	≣250			
1,36	3,426	2,363	2,126	4,129	1,38	139,7 278,2 319,5 0				
1,4	3,369	2,332	2,08	3,781	1,41	151,09 282,31 325,1 49,829	250			
1,45 1.5	3,341 3,325	2,321	2,08	3,781 3,704	1,45 1.5	156,58 283,76 325,1 49,829				
1,55	3,285	2,315	2,000	3,704	1,55	167,37 284,54 327,15 67,811	7eit (s)			
1,6	3,251	2,318	2,051	3,579	1,6	173,8 284,15 328,59 95,669	Eüllhähe ermittelt von der Widerstendemoseung			
1,65	3,209	2,318	2,051	3,579	1,65	181,61 284,15 328,59 95,669	Furnione ermitten von der widerstandsmessung			
1,7	3,186	2,318	2,039	3,498 3,498	1,7	185,83 284,15 330,02 112,9				
1,8	3,098	2,318	2,028	3,411	1,8	201,62 284,15 331,33 130,72				
1,85	3,051	2,315	2,028	3,411	1,85	209,82 284,54 331,33 130,72	3,5			
1,9	3,005	2,318	1,955	3,374	1,9	217,69 284,15 339,88 138,1	3			
2	2,909	2,234	1,946	3,349	2	233,67 295 143,02				
2,05	2,877	2,228	1,946	3,349	2,05	238,87 295,77 143,02	(g) ^{2,5}			
2,1	2,821	2,231	1,95	3,344	2,1	247,8 295,39 143,99				
2,15	2,795	2,228	1,95 1 951	3,344 3,25	2,15	251,88 295,77 143,99 258,39 295,77 161,98	₽ 1,5			
2,25	2,712	2,224	1,951	3,25	2,25	264,65 296,27 161,98				
2,3	2,687	2,228	1,946	3,201	2,3	268,41 295,77 171,08				
2,35	2,639	2,228	1,946 1 022	3,201	2,35	275,55 295,77 171,08				
2,4	2.611	2,220 2,224	1,933	3,157	2,4	279,65 296.27 179,1	Otoph Ctoph			
2,5	2,538	2,224	1,93	2,489	2,5	290,15 296,27 285,04				
2,55	2,53	2,221	1,93	2,489	2,55	291,28 296,65 285,04	Füllzeit der einzelnen Stäbe			
2,6	2,523	2,224	1,927 1 027	2,38	2,6	292,27 296,27 299,93				
2,05	2,430	2,221	1,925	2,158	2,05	305,58 296,65 328.55				
2,75	2,374	2,218	1,925	2,158	2,75	312,74 297,03 328,55	200.			
2,8	2,363	2,211	1,915	2,125	2,8	314,2 297,92 332,62	(s) 200			
2,85 2 0	2,356	2,166 2 135	1,915 1 Q∩Q	2,125	2,85	315,14 303,56 332,62 315,53 307 39 337 74				
2,95	2,333	2,101	1,909	2,083	2,95	321,07 311,55 337,74				
3	2,301	2,01	1,903	2,071	3	322,37 322,46 339,19	<u>5</u> 120			
3,05	2,163	1,955	1,903	2,071	3,05	339,93 328,88				
3,1 3,15	∠,211 2.208	1,933	1,9 1,9	2,071 2,071	3,1 3,15	331,42 333,37	ू ⁸⁰			
3,2	2,211	1,899	1,897	2,065	3,2	335,31	Š to			
3,25	2,221	1,893	1,897	2,065	3,25	335,99				
3,3	2,218	1,885	1,895	2,063	3,3	336,9				
3,35	2,215	1,00 1,871	1,892	2,003	3,35 3.4	338.48	Stab1 Stab2 Stab3 Stab4			
3,45	2,205	1,869	1,892	2,061	3,45	338,71	Füllgeschwindigkeit berechnet von der Füllzeit			
3,5	2,202	1,861	1,89	2,069	3,5	339,61	r ungesenwindigken, bereennet von der Fullzeit			

Anlage 5. Messergebnisse am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 5000 (0,8 Schichtdicke) und

Unterdruck

Widerstandsmessung am	Füllhöhe, ermittelt von der	Darstellung der Messergebnisse				
Probekörper	Widerstandsmessung					
T 26-1 26-2 26-3 26-4 0 7,964 7,956 7,967 7,967 0.05 7,964 7,956 3,828 7,967	T 26-1 26-2 26-3 26-4 0 0 0 0 0 0.05 0 0.8526 0					
0,1 7,964 7,964 3,828 7,967 0,15 7,964 7,956 3,815 7,965	0,1 0 0 9,526 0 0,15 0 0 12,68 0	8				
0,2 7,956 7,956 3,815 7,965 0,25 7,964 7,956 3,806 7,965	0,2 0 0 12,68 0 0,25 0 0 14,85 0 0,2 0 0 14,85 0	7 -				
0,35 7,964 7,964 3,801 7,965 0,4 7,964 7,964 3,801 7,965	0,35 0 0 16,05 0 0,4 0 0 16,05 0	6- - 				
0,45 7,964 7,956 3,798 7,962 0,5 7,964 7,964 3,798 7,962	0,45 0 0 16,77 0 0,5 0 0 16,77 0	<u></u> <u> <u> </u> <u> </u></u>				
0,55 7,964 7,956 3,796 7,962 0,6 7,964 7,964 3,796 7,962	0,55 0 0 17,25 0 0,6 0 0 17,25 0					
0,65 7,972 7,956 3,784 7,965 0,7 7,964 7,956 3,784 7,965 0,75 7,964 7,964 3,681 7,965	0,85 0 $0,20,11$ $00,7$ 0 $0,20,11$ $00,75$ 0 $0,44,06$ 0					
0,8 7,964 7,956 3,681 7,965 0,85 7,964 7,956 3,628 7,965	0,8 0 0 44,06 0 0,85 0 0 55,94 0	2				
0,9 7,964 7,964 3,628 7,965 0,95 7,964 7,956 3,597 7,962	0,9 0 0 55,94 0 0,95 0 0 62,76 0					
1 7,964 7,956 3,597 7,962 1,05 7,964 7,964 3,583 7,962 1,1 7,956 7,964 3,583 7,962	1,05 0 0 65,8 0 1,1 0 0 65,8 0	0 +				
1,15 7,939 7,931 3,518 3,958 1,2 7,931 7,923 3,518 3,958	1,15 0 0 79,7 0 1,2 0 0 79,7 0					
1,25 7,907 3,85 3,428 3,856 1,3 7,899 3,802 3,428 3,856 1,38 7,899 3,705 3,395 3,846	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Zeit (s)				
1,41 7,907 3,664 3,395 3,846 1,45 7,899 3,646 3,267 3,843	1,41 0 37,9 104,9 10,13 1,45 0 41,94 129,8 10,87	Widerstandsmessung am Probekörper				
1,5 7,899 3,62 3,267 3,843 1,55 7,899 3,58 3,261 3,84	1,5 0 47,71 129,8 10,87 1,55 0 56,45 130,9 11,6					
1,6 7,899 3,557 3,261 3,84 1,65 7,899 3,558 3,216 3,836 1.7 7,899 3,554 3,216 3,836	1,6 0 59,26 130,9 11,6 1,65 0 61,2 139,3 12,58 1.7 0 62,05 139,3 12,58	- Stab1 - Stab2 - Stab3 - Stab4				
1,75 7,899 3,55 3,191 3,831 1,8 7,891 3,55 3,191 3,831	1,75 0 62,91 143,9 13,8 1,8 0 62,91 143,9 13,8					
1,85 7,899 3,545 3,184 3,79 1,9 7,891 3,541 3,184 3,79 1,95 7,899 3,524 3,173 3,727	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$					
2 7,891 3,407 3,173 3,727 2,05 7,899 3,366 3,162 3,721	2 0 92,52 147,2 38,51 2,05 0 100,7 149,2 39,9					
2,1 7,891 3,362 3,162 3,721 2,15 7,899 3,35 3,156 3,695 2 2 3,899 3,264 3,156 3,695	2,1 0 101,5 149,2 39,9 2,15 0 103,8 150,3 45,87 2,2 0 120,3 150,3 45,87	E				
2,25 3,865 3,092 3,146 3,631 2,3 3,84 3,042 3,146 3,631	2,25 0 151,7 152,1 60,27 2,3 2,6 160,4 152,1 60,27					
2,35 3,817 3,021 3,138 3,599 2,4 3,802 2,979 3,138 3,599	2,35 8,194 164 153,5 67,32 2,4 11,81 171,1 153,5 67,32					
2,45 3,764 2,97 3,135 3,577 2,5 3,765 2,979 3,135 3,577 2,55 3,669 2,97 3,131 3,563	2,45 16,11 172,6 154 72,1 2,5 20,62 171,1 154 72,1 2,55 42,77 172,6 154,8 75,12					
2,6 3,637 2,974 3,131 3,563 2,65 3,628 2,956 3,007 3,553	2,6 49,94 171,9 154,8 75,12 2,65 51,94 174,9 176,4 77,27					
2,7 3,624 2,965 3,007 3,553 2,75 3,598 2,862 2,997 3,548 2,8 3,593 2,884 2,997 3,548	2,7 52,82 173,4 176,4 77,27 2,75 58,54 190,3 178 78,34 2,8 59,63 186,7 178 78,34	350 +				
2,85 3,593 2,889 2,992 3,542 2,9 3,589 2,902 2,992 3,542	2,85 59,63 185,9 178,9 79,62 2,9 60,5 183,8 178,9 79,62	0 1 2 3 4 5 6 7				
2,95 3,593 2,889 2,969 3,54 3 3,593 2,836 2,969 3,54 3 05 3,593 2,836 2,969 3,54	2,95 59,63 185,9 182,8 80,04 3 59,63 194,4 182,8 80,04 3 05 61 59 197 1 184 6 83 01					
3,1 3,584 2,802 2,958 3,526 3,15 3,584 2,802 2,778 3,518	3,1 61,59 199,8 184,6 83,01 3,15 61,59 199,8 213,5 84,7	Füllhöhe ermittelt von der Widerstandsmessung				
3,2 3,58 2,657 2,778 3,518 3,25 3,576 2,586 2,775 3,514	3,2 62,45 221,9 213,5 84,7 3,25 63,32 232,3 214 85,54 2 63 22 232,3 214 85,54					
3,35 3,571 2,571 2,774 3,504 3,4 3,571 2,571 2,774 3,504	3,35 64,4 234,4 214,1 87,64 3,4 64,4 234,4 214,1 87,64					
3,45 3,567 2,563 2,755 3,413 3,5 3,563 2,567 2,755 3,413	3,45 65,26 235,6 217,1 106,3 3,5 66,12 235 217,1 106,3	6				
3,55 3,448 2,563 2,754 3,404 3,6 3,432 2,563 2,754 3,404 3,65 3,432 2,372 2,685 3,213	3,55 90,22 235,6 217,2 108,1 3,6 93,48 235,6 217,2 108,1 3,65 93,48 262 227,7 144,9	5				
3,7 3,427 2,303 2,685 3,213 3,75 3,427 2,299 2,436 3,15	3,7 94,49 271,1 227,7 144,9 3,75 94,49 271,6 263,4 156,4					
3,8 3,427 2,296 2,436 3,15 3,85 3,423 2,296 2,431 3,122 3 9 3,423 2,296 2,431 3,122	3,8 94,49 272 263,4 156,4 3,85 95,3 272 264 161,4 3,9 95,3 272 264 161,4	(g) 4				
3,95 $3,423$ $2,295$ $2,431$ $3,1223,95$ $3,423$ $2,293$ $2,43$ $3,0694$ $3,427$ $2,293$ $2,43$ $3,069$	3,95 $95,3$ 272 264 $101,43,95$ $95,3$ $272,4$ $264,2$ $170,74$ $94,49$ $272,4$ $264,2$ $170,7$					
4,05 3,423 2,293 2,431 3,017 4,1 3,423 2,293 2,431 3,017	4,05 95,3 272,4 264 179,7 4,1 95,3 272,4 264 179,7					
4,16 3,427 2,289 2,432 2,94 4,2 3,423 2,289 2,432 2,94 4,25 3,423 2,286 2,427 2,889	4,16 94,49 272,9 263,9 192,6 4,2 95,3 272,9 263,9 192,6 4,25 95,3 273,3 264,6 200,9					
4,3 3,423 2,276 2,427 2,889 4,35 3,423 2,272 2,426 2,869	4,3 95,3 274,6 264,6 200,9 4,35 95,3 275,1 264,7 204,2					
4,4 3,423 2,269 2,426 2,869 4,45 3,419 2,262 2,101 2,789 4 5 3,419 2,252 2,101 2,789	4,4 95,3 275,5 264,7 204,2 4,45 96,11 276,4 306,6 216,8 4,5 96,11 277 306,6 216,8					
4,55 3,415 2,242 2,096 2,752 4,6 3,415 2,229 2,096 2,752	4,55 96,92 279 307,2 222,5 4,6 96,92 280,6 307,2 222,5	0+				
4,65 3,415 2,219 2,059 2,648 4,7 3,248 2,213 2,059 2,648 4,75 3,203 2,21 1,872 2,596	4,65 96,92 281,9 311,6 238,2 4,7 129,4 282,7 311,6 238,2 4,7 129,4 282,7 311,6 238,2 4,7 129,4 282,7 311,6 238,2					
4,8 3,031 2,206 1,872 2,596 4,85 3,01 2,2 1,887 2,546	4,8 168,3 283,6 333,4 245,8 4,85 171,8 284,3 331,7 253	Füllzeit der einzelnen Stäbe				
4,9 3,01 2,2 1,887 2,546 4,95 3,007 2,193 1,819 2,515	4,9 171,8 284,3 331,7 253 4,95 172,4 285,2 339,3 257,4					
5 2,465 2,193 1,819 2,515 5,05 2,469 2,19 1,819 2,437 5,1 2,48 2,184 1,819 2,437	b 255,4 285,2 257,4 5,05 254,8 285,6 268,2 5,1 253,3 286.3 268,2					
5,15 2,499 2,184 1,816 2,437 5,2 2,491 2,161 1,816 2,437	5,15 250,6 286,3 268,2 5,2 251,8 289,2 268,2	100				
5,25 2,469 1,988 1,815 2,437 5,3 2,368 1,898 1,815 2,437 5,35 2,361 1,87 1,816 2,437	5,25 254,8 310 268,2 5,3 268,5 320,4 268,2 5,35 269,5 323,6 268,2	°€ 90				
5,4 2,108 1,846 1,816 2,437 5,45 2,102 1,84 1,817 2,436	5,4 301,7 326,3 268,2 5,45 302,4 327 268,4					
5,5 2,108 1,803 1,817 2,436 5,55 2,105 1,772 1,819 2,402	5,5 301,7 331,1 268,4 5,55 302,1 334,5 273					
5,61 2,038 1,746 1,819 2,402 5,65 1,937 1,731 1,821 2,392 5,7 1,782 1,728 1,821 2,392	5,61 310,1 337,3 273 5,65 322 338,9 274,3 5,7 339,4 339,2 274,3					
5,75 1,782 1,726 1,823 2,391 5,8 1,782 1,721 1,823 2,391	5,75 339,4 274,5 5,8 274,5					
5,85 1,782 1,721 1,824 2,318 5,9 1,782 1,716 1,824 2,318 5,95 1,782 1,716 1,824 2,318	5,85 284,2 5,9 284,2 5,9 284,2					
6 1,782 1,713 1,827 2,32 6 1,782 1,711 1,827 2,32 6,05 1,782 1,711 1,829 2,148	6,05 283,9 6,05 305.8					
6,1 1,782 1,711 1,829 2,148 6,15 1,782 1,711 1,83 2,063	6,1 305,8 6,15 316,1					
0,2 1,782 1,708 1,83 2,063 6,25 1,782 1,708 1,83 2,015 6,3 1,782 1,708 1.83 2,015	b,2 316,1 6,25 321,9 6,3 321,9	0+ Stab1 Stab2 Stab3 Stab4				
6,35 1,782 1,708 1,83 2 6,4 1,782 1,708 1,83 2 6,45 1,782 1,708 1,83 2	6,35 323,6 6,4 323,6 6,4 323,6					
6,5 1,782 1,711 1,832 1,87 6,5 1,782 1,711 1,832 1,87 6,55 1,782 1,713 1,832 1,863	6,5 338,6 6,5 338,6 6,55 339,4	Füllgeschwindigkeit, berechnet von der Füllzeit				
	1					

Anlage 6. Messergebnisse am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 6369/10

,	Widerstandsmessung am Füllhöhe, ermittelt von der					lt von der	Darstellung der Messergebnisse					
	Pro	obekö	rper			Widersta	andsm	essung				
T O	Stab1 7,924	Stab2 7,924	Stab3 7,934	Stab4 7,93	т 0	Stab1 S	tab2 0	Stab3 Stab4 0 0	-Stab1	-Stab2	Stab3	Stab4
0,05 0,1 0,15	7,916 7,916 7,892	3,897 3,863 3,848	7,934 7,932 7,932	7,93 7,927 7,927	0,05 0,1 0,15	0	11,116 14,774		8			
0,2 0,25 0,3	7,884 7,884 7,884	3,848 3,848 3,844	3,912 3,912 3.842	7,892 7,892 7.89	0,2 0,25 0,3	0	14,774 14,774 15,745	0 0 0 0 16.229 0	7			
0,35 0,4	7,884 7,884	3,844 3,844	3,842 3,834	7,89 7,892	0,35 0,4	0	15,745 15,745	16,229 0 18,164 0	р 6 - С -			
0,45 0,5 0,55	7,884 7,884 7,884	3,848 3,844 3,844	3,834 3,788 3,788	7,892 7,892 7,892	0,45 0,5 0,55	0	14,774 15,745 15,745	18,164 0 29,144 0 29,144 0	c stal			
0,6 0,65	7,884 7,884 7,884	3,848 3,844 3,844	3,768 3,768 3,703	7,892 7,892 7,89	0,6 0,65	0	14,774 15,745 15 745	33,843 0 33,843 0 48,815 0				
0,75 0,8	7,884 7,876	3,834 3,834 3,82	3,703 3,703 3,682	7,89 7,89 7,89	0,7 0,75 0,8	0	18,164 21,531	48,815 0 48,815 0 53,555 0	$\geq \frac{3}{2}$			
0,85 0,9 0.95	7,884 7,884 7,876	3,791 3,749 3,657	3,682 3,67 3,67	7,89 7,887 7,887	0,85 0,9 0.95	0 :	28,435 38,267 59 139	53,555 0 56,243 0 56,243 0	1			
1 1,05	7,876 7,876	3,586 3,547	3,66 3,66	7,887 7,887	1 1,05	0	74,652 82,962	58,472 0 58,472 0	0			
1,1 1,15 1,2	7,884 7,876 7,876	3,466 3,416 3,392	3,549 3,549 3,448	7,885 7,885 7,875	1,1 1,15 1,2		99,766 109,84 114,6	82,54 0 82,54 0 103,42 0	0 1	2 3	4 5	6 7
1,25 1,3	7,868 7,876	3,351 3,331	3,448 3,373	7,875 7,88 7,88	1,25 1,3	0	122,62 126,48	103,42 0 118,33 0		Zei	t (s)	
1,41 1,45	7,868 7,876	3,249 3,218	3,31 3,31	7,878 7,878	1,41 1,45	0	141,96 147,68	130,49 0 130,49 0	Wide	rstandsmessung	am Probekörj	per
1,5 1,55 1,6	7,868 7,868 7,868	3,158 3,063 3,028	3,233 3,233 3,178	7,878 7,878 7,878	1,5 1,55 1,6	0	158,53 175,17 181,15	144,92 0 144,92 0 154,94 0				
1,65 1,7	7,868 7,868	2,965 2,875	3,178 3,167	7,878 7,875 7,875	1,65 1,7	0	191,69 206,3	154,94 0 156,92 0	Stab1	Stab2	Stah3	Stab/
1,8 1,85	7,868	2,771 2,742	3,116 3,116	7,875	1,8 1,85	0	222,55 226,97	165,97 0 165,97 0		JIAUZ	- 51805	
1,9 1,95 2	7,868 7,868 7,868	2,734 2,709 2,672	2,959 2,959 2,954	7,873 7,873 7,873	1,9 1,95 2	0 2	228,18 231,94 237,43	192,68 0 192,68 0 193,5 0	50			
2,05 2,1	7,868	2,593	2,954	7,873	2,05 2,1	0	248,92 251,21	193,5 0 203,41 0	ੁੰ 100		` }_	
2,15 2,2 2,25	7,86 7,86 7,86	≥,569 2,512 2,434	≥,893 2,867 2,867	7,871 7,871 7,871	2,15 2,2 2,25		260,35 271,05	207,57 0 207,57 0	<u>ε</u> 150	N.	Ľ,	
2,3 2,35	7,868 7,86 7,86	2,409 2,36	2,861 2,861	7,871 7,871 7,871	2,3 2,35	0	274,41 280,92	208,52 0 208,52 0 209,15 0	9 200 -			
2,45 2,5	7,86 7,86	2,311 2,284	2,857 2,853	7,871 7,868	2,45 2,5	0	287,32 290,8	209,16 0 209,79 0	250			
2,55 2,6 2,65	7,86 7,86 7,86	2,274 2,237 2,224	2,853 2,846 2,846	7,868 7,868 7,868	2,55 2,6 2,65	0	292,08 296,77 298,41	209,79 0 210,89 0 210,89 0	300 -			
2,7 2,75	7,86 7,86	2,214 2,211	2,841 2,841	7,868 7,868	2,7 2,75	0	299,66 300,04	211,68 0 211,68 0	350		~ ~	
2,85 2,9	7,86 7,86 7,86	2,198 2,198 2,191	2,837 2,837 2,833	7,868 7,868	2,8 2,85 2,9	0	302,9 301,66 302,53	212,31 0 212,31 0 212,94 0	0 -	1 2 3	4 5	6 7
2,95 3 3.05	7,86 7,86 7,852	2,106 2,106 2,106	2,833 2,83 2.83	7,868 7,866 7,866	2,95 3 3.05	0	312,93 312,93 312,93	212,94 0 213,41 0 213.41 0	Ū.	J	Zeit (s)	
3,1 3,15	7,86 7,86	2,103 2,106	2,827 2,827	7,866 7,866	3,1 3,15	0	313,29 312,93	213,88 0 213,88 0	Füllhöhe e	rmittelt von der	Widerstandsr	nessung
3,2 3,25 3,3	7,86 7,852 7,852	2,084 2,045 1,968	2,824 2,824 2,292	7,866 7,866 7,859	3,2 3,25 3,3	0	315,57 320,2 329,18	214,35 0 214,35 0 289,77 0				C
3,35 3,4 3,45	7,852 7,86 7,852	1,948 1,943 1,906	2,292 2,191 2 191	7,859 7,859 7,859	3,35 3,4 3,45	0	331,48 332,05 336 25	289,77 0 302,53 0 302,53 0				
3,5 3,55	4,022 3,922	1,892 1,887	2,133 2,133	7,827 7,827	3,5 3,55	0 3 17,468	337,82	309,66 0 309,66 0	41			
3,65 3,7	3,863 3,844	1,876 1,876 1,876	2,053 2,053 2,046	7,822 7,822 7,824	3,65 3,7	32,116 36,745		319,26 0 319,26 0 320,09 0	3,5			
3,75 3,8 3,85	3,82 3,801 3,796	1,876 1,873 1,873	2,046 2,039 2,039	7,824 7,822 7,822	3,75 3,8 3,85	42,531 47,065 48,252		320,09 0 320,91 0 320,91 0	3			
3,9 3,95	3,782 3,772	1,876 1,873	1,857 1,857	3,99 3,99	3,9 3,95	51,558 53,907		341,73 4,0511 341,73 4,0511	\widehat{a} 25			
4 4,05 4,1	3,758 3,754 3,74	1,873 1,87 1,865	1,8 1,8 1,798	3,818 3,818 3,76	4 4,05 4,1	57,177 58,107 61,349		348 47,01 47,01 60,711	6 eit (s			
4,16 4,2 4,25	3,717 3,707 3,689	1,862 1,859 1,856	1,798 1,797 1 797	3,76 3,72 3,72	4,16 4,2 4,25	66,628 68,906 72,98		60,711 69,943 69,943				
4,3 4,35	3,676 3,648	1,856 1,854	1,798 1,798	3,663 3,663	4,3 4,35	75,901 82,133		82,805 82,805	LE 1,5			
4,4 4,45 4,5	3,56 3,517 3,475	1,851 1,848 1,848	1,798 1,798 1,798	3,624 3,624 3,6	4,4 4,45 4,5	101,21 110,26 118,93		91,412 91,412 96,633				
4,55 4,6 4.65	3,429 3,416 3,416	1,846 1,846 1 843	1,798 1,797 1 797	3,6 3,49 3,49	4,55 4,6 4.65	128,24 130,84 130,84		96,633 119,85 119,85	0,5			
4,7 4,75	3,412 3,416	1,843 1,843	1,798	3,411 3,411	4,7 4,75	131,64 130,84		135,84 135,84	0 <i>⊬</i> Stab1	Stab2	Stab3	Stab4
4,8 4,85 4,9	3,4 3,364 3,343	1,84 1,84 1,84	1,797 1,797 1,798	3,326 3,326 3,221	4,8 4,85 4,9	134,02 141,09 145,17		152,44 152,44 172,13	1	Füllzeit der einz	elnen Stäbe	
4,95 5	3,324 3,304 3,284	1,838 1,838 1,835	1,798 1,797 1 797	3,221 3,198 3,198	4,95 5	148,82 152,63 156,42		172,13 176,32 176 32				
5,1 5,15	2,221 2,081	1,838 1,835	1,798 1,798	3,166 3,166	5,1 5,15	319,78 336,93		182,1 182,1				
5,2 5,25 5,3	2,054 2,048 2,039	1,832 1,832 1,832	1,798 1,798 1,798	3,101 3,101 3,02	5,2 5,25 5,3	340,14		193,59 193,59 207,5	200			
5,35 5,4	2,033 2,027	1,832 1,832	1,798 1,699	3,02 2,979 2,979	5,35 5,4			207,5 214,37 214,27	≈ 180			
5,5 5,55	2,021 2,018 2,009	1,829 1,829 1,832	1,771	2,944 2,944	5,5 5,55			220,14 220,14 220,14	E 160			
5,61 5,65 5,7	2,003 2 1,995	1,832 1,829 1,832	1,789 1,789 1,709	2,934 2,934 2,885	5,61 5,65 5,7			221,78 221,78 229,7				I
5,75 5,8	1,995 1,986	1,829 1,832	1,709 1,704	2,885	5,75 5,8			229,7 229,86	5, 120	í.		
5,9 5,95	1,98 1,974	1,829 1,829	1,714	2,829 2,829	5,9 5,95			238,57 238,57	.c. 100- M 80-			<u>A</u>
6 6,05 6,1	1,968 1,966 1,96	1,829 1,829 1,829	1,714 1,714 1,707	2,784 2,784 2,77	6 6,05 6,1			245,55 245,55 247,7	00 sch		<u> </u>	A
6,15 6,2 6,25	1,957 1,948 1,943	1,829 1,829 1,827	1,707 1,73 1,73	2,77 2,75 2,75	6,15 6,2 6,25			247,7 250,75 250,75	əb 40			
6,3 6,35	1,937	1,829	1,73	2,749	6,3 6,35			250,91 250,91	· 문 20			
6,45 6,5	1,931 1,923 1,914	1,829 1,829 1,827	1,707	2,742 2,742 2,71	6,45 6,5			251,97 251,97 256,79	0 + Stab1	Stab2	Stab3	Stab4
6,55 6,6 6,65	1,909 1,906 1,9	1,829 1,827 1,829	1,686 1,659 1,659	2,71 2,141 2,141	6,55 6,6 6,65			256,79 333,68 333,68	Füllgeschv	windigkeit, bered	chnet von der	Füllzeit
6,7	1,895	1,827	1,633	2,086	6,7			340,33	8	J ,		

Anlage 7. Messergebnisse am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 6369/10 und Unterdruck

,	Widerstandsmessung am Füllhöhe, ermittelt von der					er	Darstellung der Messergebnisse			
	Probekör	per			Widerstandsmessung					
T 0 0,05	Stab1 Stab2 8,061 8,061 8,061 8,061	Stab3 3,887 3,878	Stab4 8,071 8,071	T 0 0,05	Stab1 Stab2 Stab3 S 0 0 0 0 0 2,2193	itab4 0 0	Stab1	-Stab2	Stab3	Stab4
0,1 0,15	8,061 8,07 8,07 8,07	3,878 3,867	8,071 8,071	0,1 0,15	0 0 2,2193 0 0 4,9524	0	7			
0,2 0,25	8,061 8,061 8,061 8,07	3,867 3,852	8,071 8.071	0,2 0,25	0 0 4,9524 0 0 8,6559	0	6			
0,3	8,061 8,061	3,852	8,071	0,3	0 0 8,6559	0	р 5 -			
0,35	8,061 8,061	3,792	8,069	0,35	0 0 23,206	0	4 test		<u> </u>	
0,45 0,5	8,061 8,07 8,061 8,061	3,724 3,724	8,069 8,069	0,45 0,5	0 0 39,202 0 0 39,202	0	. <u>5</u> 3 -			
0,55 0,6	8,061 8,061 8,061 8,07	3,681 3,681	8,069 8,069	0,55 0,6	0 0 49,058 0 0 49,058	0 0	2			
0,65	8,061 8,061	3,452	8,066	0,65	0 0 98,405	0	1			
0,75	8,02 3,905	3,426	8,029	0,75	0 0 103,7	0	0		- 0 05	
0,85	8,02 3,852	3,395	8,025	0,85	0 8,6559 109,92	0	0 0,5 1	1,5 2 2,3 Zeit	s) s s,s	4 4,5 5
0,9 0,95	8,02 3,814 8,02 3,771	3,395 3,332	8,027 8,027	0,9 0,95	0 17,919 109,92 0 28,201 122,33	0	Wide	erstandsmessung	am Probekörne	r
1 1,05	8,02 3,739 8,02 3,599	3,332 3,19	8,027 8,024	1 1,05	0 35,718 122,33 0 67,318 149,1	0 0		B	um 1100 enorp	
1,1 1.15	8,012 3,594 8.012 3.59	3,19 3,126	8,024 8,024	1,1 1.15	0 68,41 149,1 0 69,281 160.65	0				
1,2	8,012 3,59 8,02 3,586	3,126	8,024	1,2	0 69,281 160,65	0	-Stab1	Stab2	-Stab3	-Stab4
1,3	8,012 3,586	3,113	8,024	1,3	0 70,151 162,97	0				
1,30	8,02 3,508 8,012 3,428	3,079	8,022	1,36	0 103,29 168,95	0	<u> </u>			
1,45 1,5	8,012 3,416 8,02 3,392	3,058 3,058	8,022 8,022	1,45 1,5	0 105,71 172,6 0 110,52 172,6	0	Ĕ 100 -		N.	
1,55 1,6	8,012 3,375 8,02 3,367	3,039 3,039	8,02 8,02	1,55 1,6	0 113,9 175,88 0 115,48 175,88	0 0	ο 150 - 		L N	
1,65 1,7	8,02 3,367 8,012 3,351	2,914 2,914	8,02 8,02	1,65 1,7	0 115,48 196,85 0 118,62 196,85	0 0		- Notes		
1,75 1.8	8,012 3,343 8,012 3,268	2,81 2 81	8,017 8,017	1,75 1.8	0 120,19 213,53 0 134 59 213 53	0	iii 250 -	1 V		
1,85	8,012 3,218	2,787	8,017	1,85	0 143,95 217,13	0	300 -		\	
1,95	8,012 3,192	2,714	8,015	1,95	0 144,3 217,13	0	350 +	4 45 0 4		
2 2,05	8,012 3,181 8,012 3,181	2,714 2,663	8,015 8,015	2,05	0 150,74 228,34 0 150,74 235,99	0	0 0,5	1 1,5 2 4	2,5 3 3,5	4 4,5 5
2,1 2,15	8,012 3,118 8,003 3,103	2,663 2,636	8,015 8,013	2,1 2,15	0 162,08 235,99 0 164,73 239,99	0 0	Fallbah.	Ze	NV: J J	
2,2 2,25	8,003 3,096 8,003 3,071	2,636 2,553	8,013 8,015	2,2 2,25	0 165,97 239,99 0 170,35 252,01	0 0	Fullione	eminiten von der	w luci stallusillo	essuing
2,3 2,35	8,003 3,035 4,041 3,01	2,553 2,414	8,015 3,985	2,3 2,35	0 176,57 252,01 0 180,84 271,35	0 0				
2,4 2,45	3,881 2,968 3,739 2,949	2,414 2,396	3,985 3,765	2,4 2,45	1,4714 187,92 271,35 35,718 191,09 273,78 2	0 29,619				
2,5 2,55	3,684 2,945 3.643 2.931	2,396 2,209	3,765 3.667	2,5 2,55	48,377 191,75 273,78 2 57,605 194,06 298,17 5	29,619 52,224	25			
2,6 2,65	3,608 2,9 3.56 2.887	2,209 2,181	3,667 3.644	2,6 2,65	65,347 199,14 298,17 5 75,766 201,25 301,69 5	52,224 57.382	3,3			
2,7 2,75	3,529 2,864 3,525 2,86	2,181	3,644	2,7 2,75	82,376 204,96 301,69 5 83,222 205 6 325 74	57,382				
2,8	3,504 2,847	1,982	3,422	2,8	87,641 207,68 325,74	104,5	c, z, z			
2,85	3,363 2,778	1,84	3,374	2,85	116,27 218,53	114,1				
2,95 3	3,288 2,72 3,288 2,716	1,833	3,354 3,354	2,95	130,8 228,04 1	118,04 118,04	1			
3,05 3,1	3,226 2,671 3,215 2,615	1,833 1,833	3,241 3,241	3,05 3,1	142,46 234,8 1 144,5 243,06 1	139,67 139,67	0.5			
3,15 3,2	3,215 2,564 3,169 2,526	1,831 1,831	3,18 3,18	3,15 3,2	144,5 250,44 1 152,92 255,84 1	150,93 150,93	0,5			
3,25 3,3	3,169 2,496 3,085 2.493	1,831 1,831	3,049 3,049	3,25 3,3	152,92 260,06 1 167,9 260,48 1	174,16 174,16	Stab1	Stab2	Stab3	Stab4
3,35 3 4	3,074 2,463 2,963 2,456	1,831	3,021	3,35 3 4	169,82 264,64 1 188,76 265.61 1	178,97		Füllzeit der einz	elnen Stäbe	
3,45	2,959 2,448	1,831	2,866	3,45	189,43 266,71 2 189,43 269 22	204,64		- anzen der eniz		
3,55	2,809 2,437	1,831	2,800	3,55	211,8 268,22 2	210,85				
3,6 3,65	2,825 2,434 2,812 2,437	1,831 1,831	2,827 2,825	3,6 3,65	211,17 268,63 2 213,22 268,22 2	210,85 211,17	190			ſ
3,7 3,75	2,757 2,409 2,749 2,342	1,831 1,831	2,825 2,692	3,7 3,75	221,78 272,03 2 223,01 280,99 2	211,17 231,66	€ 160			
3,8 3,85	2,72 2,317 2,712 2,314	1,831 1,828	2,692 2,599	3,8 3.85	227,43 284,28 2 228,65 284,67 2	231,66 245.39	E 140			
3,9	2,572 2,314	1,828	2,599	3,9	249,29 284,67 2	245,39) 140 120			
3,95	2,434 2,283	1,827	2,303	3,95	268,63 288,71 2 268,63 288,71 2	286,11	ži 100		<u>\</u>	
4,05	2,373 2,28 2,297 2,277	1,825	1,912	4,05	210,87 289,1 3 286,89 289,49 3	333,83	80 Air			
4,15 4,2	2,22 2,277 2,21 2,273	1,824 1,824	1,878 1,878	4,15 4,2	296,78 289,49 3 298,05 290 3	337,69 337,69	-ug 60			
4,25 4,3	2,207 2,277 2,207 2,273	1,824 1,824	1,875 1,875	4,25 4,3	298,42 289,49 3 298,42 290 3	338,03 338,03	<u>භ</u> 40			
4,35 4.4	2,197 2,277 2,197 2.273	1,823 1,823	1,865 1,865	4,35 4,4	299,68 289,49 3 299,68 290	339,16	금 20			
4,45	2,194 2,143	1,821	1,864	4,45	300,06 306,41		0.⊬ Stab	1 Stab2	Stab3	Stab4
4,55	2,165 2,072	1,819	1,866	4,55	303,68 315,06 336,33 326,33		D-11 1			
4,65	1,862 1,764	1,817	1,865	4,65	339,49 350,33		Fullgesch	windigkeit, bered	innet von der F	unzeit

Anlage 8. Messergebnisse am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 6369/10, Unterdruck und Ar-

Behandlung

Anlage 9. Messergebnisse am Beispiel beim steigenden Gießen mit Disopast 5000, Unterdruck und Ar-

Behandlung

Widerstandsmessung am	Füllhöhe, erm	ittelt von der	Darstellung der Messergebnisse			
Probekörper	Widerstand	lsmessung				
Dubb Dubb <th< td=""><td>Number Number Number Number 0 0 0 0 0 0 0.11 20.01 0 0 0 0 0.15 40.14 0 0 0 0 0.15 50.071 0 0 0 0 0.15 50.071 0 0 0 0 0.15 70.071 10.52 0 0 0 0 0.15 70.071 10.52 0</td><td>Subsection Subsection Subseci</td><td>Füllgeschwindig</td><td>Stab2</td><td>Stab3</td><td>Stab4</td></th<>	Number Number Number Number 0 0 0 0 0 0 0.11 20.01 0 0 0 0 0.15 40.14 0 0 0 0 0.15 50.071 0 0 0 0 0.15 50.071 0 0 0 0 0.15 70.071 10.52 0 0 0 0 0.15 70.071 10.52 0	Subsection Subseci	Füllgeschwindig	Stab2	Stab3	Stab4

Anlage 10. Messergebnisse am Beispiel beim steigenden Gießen mit Disopast 6369/10, Unterdruck und Ar-Behandlung

Widerstandsmessung am	Füllhöhe, ern	nittelt von der	Darstellung der Messergebnisse		
Probekörper	Widerstan	dsmessung			
Probekörper Probekörper T Stab Stab Stab Stab 4 8.03 8.04 8.03 4.65 2.07 2.05 2.3 3.46 0.1 3.68 8.03 8.04 8.03 4.66 2.07 2.05 2.3 3.46 0.1 3.68 8.02 8.04 8.03 4.7 2.06 2.05 2.28 3.23 0.2 3.68 8.03 8.03 8.03 4.85 2.05 2.19 2.96 0.3 3.68 8.03 8.03 8.03 5.0 2.04 2.18 2.40 0.5 3.68 8.03 8.03 8.03 5.0 2.04 2.18 2.40 0.5 3.58 8.03 8.03 8.03 5.55 2.03 2.04 2.16 2.60 0.6 3.38 8.03 8.03 8.03 5.55 2.01 2.03 2.14 2.62 0.7 3.33 8.02 8.03 8.03	Widerstan 1 Stabl Stabl Stabl 0 0 0 0 0 0,15 1,97 0 0 0 0,15 1,04 0 0 0 0,25 25,4 0 0 0 0,25 25,4 0 0 0 0,45 64,9 0 0 0 0,45 64,9 0 0 0 0,55 68,7 0 0 0 0,65 77,3 0 0 0 0,75 103 0 0 0 0,85 115 0 0 0 0,91 120 0 0 0 1,15 168 0 0 0 1,25 220 0 0 0 1,55 241 0 0 0 1,55 241 0 0 0	d.sb. 314 318 286 58.1 4.65 315 318 281 97 4.65 315 318 281 137 4.75 317 318 288 138 4.85 318 318 281 144 4.85 318 318 318 310 184 4.95 319 318 301 184 5.05 320 319 302 210 5.15 320 319 302 210 5.15 320 319 302 210 5.15 320 319 302 210 5.16 320 319 301 225 5.25 321 319 301 226 5.55 323 320 301 226 5.56 324 331 310 256 5.56 324 331 310 216 5	$\frac{1}{90}$		

Anlage 11. Porosität und Porenmesswerte am Beispiel beim fallenden Gießen ohne Schlichte und mit

Unterdruck

Feld	Objekt	Fläche	Umfang	Formfaktor	MinFeret	MittFeret	MaxFeret
1	18514	2065,73138	335,58226	0,23	20,326	110,37018	162,91289
1	18515	94507,211	1142,4228	0,91	337,10671	364,34355	386,90541
1	18516	78910,939	1202,6894	0,69	284,564	356,7213	421,56124
1	18517	71371,019	1043,8417	0,82	294,727	330,19587	369,83157
1	18518	1962,4448	230,29358	0,46	46,64817	67,88884	81,91378
1	18519	413,14628	77,13717	0,87	20,326	25,81402	28,76129
1	18520	155343	1553,1097	0,81	437,009	471,66483	512,62172
1	18521	56910,899	1005,22233	0,71	254,075	311,19106	364,64844
1	18522	88103,443	1403,307	0,56	274,401	396,56026	512,62172
1	18523	103,286569	38,51777	0,87	10,163	12,90701	14,32983
1	18524	15906,1316	632,95164	0,5	149,19284	171,34818	183,13726
1	18525	9502,3644	495,85277	0,49	97,76806	146,65209	181,71444
2	18622	103,286569	38,51777	0,87	10,163	12,90701	14,32983
2	18623	108760,757	1498,636	0,61	384,77118	408,34934	433,75684
2	18624	18901,442	553,68024	0,77	128,96847	177,24272	213,62626
2	18625	103,286569	38,51777	0,87	10,163	12,90701	14,32983
2	18626	1239,4388	175,71827	0,5	46,03839	54,27042	65,0432
2	18627	120948,572	1639,1903	0,57	411,6015	453,2698	479,59197
2	18628	72713,745	1058,3748	0,82	284,564	333,14314	377,0473
2	18629	64554,106	1115,186	0,65	262,51029	341,98495	432,23239
2	18630	56084,607	1024,532	0,67	254,075	312,61388	372,67721
2	18631	206,57314	57,82747	0,78	10,163	19,3097	22,76512
2	18632	88723,163	1422,5151	0,55	274,401	400,01568	515,2641
2	18633	13323,9674	670,14822	0,37	71,141	218,19961	315,053
2	18634	103,286569	38,51777	0,87	10,163	12,90701	14,32983
2	18635	1549,2985	170,12862	0,67	43,09112	57,01443	71,85241
3	18636	2788,7374	285,78356	0,43	30,489	93,60123	132,52552
3	18637	206,57314	57,82747	0,78	10,163	19,3097	22,76512
3	18638	2375,5911	220,02895	0,62	40,652	72,05567	86,79202
3	18639	15286,4122	491,17779	0,8	111,793	162,91289	192,79211
3	18640	25718,356	616,99573	0,85	182,934	198,58502	214,33767
3	18641	9812,2241	460,58716	0,58	99,49577	138,42006	164,13245
3	18642	58047,052	907,45427	0,89	254,075	289,6455	322,98014
3	18643	1859,1582	178,05576	0,74	40,652	58,9454	73,98664
3	18644	7849,7792	394,83255	0,63	98,17458	126,93587	145,53416
3	18645	516,43284	90,75559	0,79	20,326	30,38737	36,5868
3	18646	826,29255	109,96366	0,86	30,489	36,89169	43,09112
3	18647	16629,138	523,08961	0,76	130,28966	167,99439	205,49586
3	18648	73126,891	1024,532	0,88	291,98299	323,1834	341,57843







Anlage 12. Porosität und Porenmesswerte am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 5000

Feld	Objekt	Fläche	Umfang	Formfaktor	MinFeret	MittFeret	MaxFeret
1	6301	103,286569	38,51777	0,87	10,163	12,90701	14,32983
1	6302	826,29255	115,55331	0,78	20,326	38,72103	45,42861
1	6303	1136,1523	148,58306	0,65	20,326	49,7987	64,23016
1	6304	723,00598	109,96366	0,75	20,326	36,79006	45,42861
1	6305	89342,882	2751,0225	0,15	303,06066	575,32743	791,79933
1	6306	516,43284	90,75559	0,79	20,326	30,38737	36,5868
1	6307	1446,012	181,30792	0,55	30,489	59,04703	73,98664
1	6308	206,57314	57,82747	0,78	10,163	19,3097	22,76512
1	6309	103,286569	38,51777	0,87	10,163	12,90701	14,32983
1	6310	11568,0957	756,63535	0,25	111,793	173,7873	219,31754
1	6311	206,57314	57,82747	0,78	10,163	19,3097	22,76512
1	6312	516,43284	90,75559	0,79	20,326	30,38737	36,5868
2	6409	1136,1523	183,74704	0,42	30,489	56,20139	71,85241
2	6410	1032,8657	123,58208	0,85	30,489	41,46504	45,42861
2	6411	103,286569	38,51777	0,87	10,163	12,90701	14,32983
2	6412	206,57314	57,82747	0,78	10,163	19,3097	22,76512
2	6413	619,71941	98,78436	0,8	28,76129	33,02975	36,5868
2	6414	1446,012	181,40955	0,55	20,326	60,77474	83,84475
2	6415	125286,608	3317,2032	0,14	438,0253	564,24976	676,8558
2	6416	619,71941	96,44687	0,84	20,326	32,21671	36,5868
2	6417	413,14628	77,13717	0,87	20,326	25,81402	28,76129
2	6418	57117,473	1120,8773	0,57	278,05968	323,99644	362,61584
2	6419	413,14628	77,13717	0,87	20,326	25,81402	28,76129
2	6420	929,57912	189,43832	0,33	19,61459	60,36822	86,79202
2	6421	3511,7433	233,54574	0,81	50,815	78,35673	95,83709
2	6422	5577,4747	439,95627	0,36	40,652	141,97711	204,2763
3	6423	5990,621	470,95342	0,34	93,29634	131,71248	152,34337
3	6424	18281,723	994,85607	0,23	151,83522	231,7164	305,60141
3	6425	619,71941	104,37401	0,71	20,326	34,96072	41,87156
3	6426	413,14628	90,75559	0,63	20,326	29,77759	36,5868
3	6427	1032,8657	137,30213	0,69	35,5705	45,22535	57,52258
3	6428	70234,867	1379,7289	0,46	220,43547	409,36564	566,99377
3	6429	619,71941	104,37401	0,71	20,326	34,96072	41,87156
3	6430	103,286569	38,51777	0,87	10,163	12,90701	14,32983
3	6431	309,85971	71,44589	0,76	20,326	23,88305	28,76129
3	6432	5887,3344	386,70215	0,49	79,06814	115,55331	144,41623
3	6433	358094,53	3835,7195	0,31	610,59304	876,0506	1121,0805
3	6434	39145,61	1078,9041	0,42	242,28592	296,96286	342,59473
3	6435	5990,621	342,59473	0,64	80,99911	106,40661	130,0864



Anlage 13. Porosität und Porenmesswerte am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 6369/10

1 7726 364,1980099 84,398517 0.64 15,73425 27,5349375 35,181735 1 7726 309,1832 90,513896 0,47 17,83215 26,978994 33,618847 1 7728 33,00883 7,3741185 0,76 2,0979 2,4650325 2,9885285 1 77728 33,00883 7,3741185 0,76 3,14685 4,6888065 5,643351 1 77730 12,1032571 14,160825 0,76 3,14685 3,9964995 4,447548 1 77731 6,6017766 11,3266615 0,87 3,14685 3,9964995 4,447548 1 77733 6,6017766 11,349639 0,64 2,0979 3,7447515 4,6888065 1 77735 6,6017766 10,727165 0,71 2,0979 3,608388 4,321674 1 77735 6,6017766 10,727165 0,71 2,0979 3,608388 4,221674 1 77736 6,1007721165 0,77	Feld	Objekt	Fläche	Umfang	Formfaktor	MinFeret	MittFeret	MaxFeret
1 7726 309,1832 90,513896 0.47 17,82215 26,978994 33,618847 1 7727 459,92377 91,227181 0.69 24,702772 27,63932 31,111857 1 7728 3,900883 7,3741185 0.76 2,49799 2,4650325 2,988525 1 77730 12,1032571 14,16028 0.76 3,14685 4,688065 5,643351 1 7730 12,1032571 14,16028 0,64 2,0979 3,747715 4,688065 1 7733 6,6017766 10,7727160 0,64 2,0979 3,747815 4,688065 1 7735 6,6017766 10,7727165 0,71 2,0979 3,60838 4,321674 1 7736 6,6017766 10,7727165 0,71 2,0979 3,608388 4,321674 1 7736 1,1002961 3,9755205 0,87 1,04895 1,3321665 1,4790195 2 7790 709,69099 110,65834 0,767	1	7725	364,1980099	84,398517	0,64	15,73425	27,5349375	35,181783
1 7727 459,92377 91,227181 0.69 24,702772 27,639832 31,111857 1 7729 335,0063 7,3741185 0,76 2,0979 2,4650325 2,968285 1 7729 335,0063 85,699215 0,68 21,451028 25,332143 29,391579 1 7730 12,1032571 14,160825 0,76 8,3916 10,678311 13,133435 1 7732 9,902665 11,9265615 0,87 3,14685 3,9964995 4,447548 1 7733 6,6017766 11,9265615 0,71 3,9964995 4,447548 1 7733 6,6017766 10,7727165 0,71 2,0979 3,08088 4,321674 1 7736 11,002961 12,7657215 0,85 1,4485 5,498455 5,244757 2 7790 709,69099 110,055834 0,74 25,447527 34,625839 43,657299 2 7791 755,002111 993,050 87,933478	1	7726	309,1832	90,513896	0,47	17,83215	26,978994	33,618847
1 7729 3,3008883 7,3741185 0,76 2,0979 2,465022 2,9685285 1 7773 12,1032571 14,160825 0,76 3,14685 4,6888065 5,643351 1 7733 67,118062 3,377589 0,76 3,14685 3,9964995 4,447548 1 7733 6,6017766 11,34639 0,64 2,0979 3,7447515 4,6888065 1 7734 16,6017766 10,772715 0,74 3,14885 5,5489455 7,0384545 1 7735 6,6017766 10,772715 0,74 3,14885 4,2692265 5,244757 1 7736 1,1002961 3,9755205 0,87 1,04895 1,3321665 1,4790195 2 7790 709,69099 110,05583 0,76 28,269203 34,269196 38,003457 2 7793 339,06 87,933478 0,64 21,839139 25,562912 2,989483 2 7796 1,002961 3,955205 0	1	7727	459,92377	91,227181	0,69	24,702772	27,639832	31,111857
1 7729 395,0063 85,699215 0.68 21,451028 25,332143 29,91579 1 77730 12,1032571 14,160825 0.76 8,316 10,678311 13,143845 1 77733 6,6017766 11,3265615 0.87 3,14685 3,9964995 4,447548 1 77733 6,6017766 11,349639 0.64 2,0979 3,7447515 4,6888065 1 77734 16,504442 16,730752 0.74 3,14685 5,2489455 7,0384545 1 77736 11,002961 12,7657215 0.85 3,14685 4,2692265 5,24475 2 7790 709,69099 110,055834 0.74 28,269203 34,625139 43,867299 2 7791 755,90342 111,849539 0.76 28,269203 34,625139 43,803459 2 7794 450,02111 92,150257 0.67 23,398487 27,687388 31,111857 2 7794 33,39,06 87,933478 </th <td>1</td> <td>7728</td> <td>3,3008883</td> <td>7,3741185</td> <td>0,76</td> <td>2,0979</td> <td>2,4650325</td> <td>2,9685285</td>	1	7728	3,3008883	7,3741185	0,76	2,0979	2,4650325	2,9685285
1 7730 12,1032571 14,160825 0,76 3,14685 4,6880065 5,643351 1 7732 9,902665 11,3266515 0,87 3,14685 3,9964995 4,447548 1 7733 6,6017766 11,349639 0,64 2,0979 3,7447515 4,6880665 1 7733 6,6017766 10,772155 0,71 2,0979 3,608388 4,321674 1 7736 6,6017766 10,77217155 0,85 3,14685 4,2692265 5,24475 1 7736 11,002961 12,7657215 0,85 3,14685 4,2692265 5,24475 2 7790 709,6099 110,055834 0,74 25,447527 34,269196 38,003459 2 7792 450,02111 92,150257 0,67 2,3989487 27,587385 1,11187 2 7793 393,906 87,933478 0,64 21,839139 25,56212 2,98948 2 7794 22,005922 18,965016	1	7729	395,0063	85,699215	0,68	21,451028	25,332143	29,391579
1 7731 67,18062 33,377589 0,76 8,9916 10,678311 13,1433435 1 7732 9,902665 11,9265615 0,87 3,14685 3,9964995 4,44754 1 7733 6,6017766 11,346343 0,64 2,0979 3,60338 4,44754 1 7734 16,504442 16,730752 0,74 3,14685 5,5489455 7,0384545 1 7736 6,1017766 10,7727165 0,71 2,0979 3,608388 4,21674 1 7737 1,1002961 3,9755205 0,87 1,04895 1,3321665 1,4790195 2 7790 709,69099 110,05834 0,74 25,447527 34,625839 34,567299 2 7792 450,02111 92,150257 0,67 23,989487 27,587385 31,111857 2 7793 393,906 87,933478 0,64 21,89139 25,562912 29,98948 2 7794 32,005828 12,173095 0,	1	7730	12,1032571	14,160825	0,76	3,14685	4,6888065	5,643351
1 7732 9.902665 11.9265615 0.87 3.14685 3.9964995 4.447548 1 7733 6.6017766 11.349639 0.64 2.0979 3.7447515 4.6888065 1 7734 16.504442 16.730752 0.74 3.14685 5.5489455 7.0384545 1 7736 6.6017766 10.7727165 0.71 2.0979 3.608388 4.321674 1 77736 11.002961 12.7657215 0.85 3.14685 4.2692265 5.244752 2 7790 709.69099 110.055834 0.74 25.447527 34.625839 43.657299 2 7792 450.02111 92.150257 0.67 23.89487 27.587385 31.11857 2 7793 393.906 87.933478 0.64 21.839139 25.562912 29.89848 2 7794 22.005922 5.9685255 0.76 1.04895 1.3321665 1.4790195 2 7797 8.023688 12.1783095	1	7731	67,118062	33,377589	0,76	8,3916	10,678311	13,1433435
1 7733 6.6017766 11,349639 0.64 2.0979 3,7447515 4,6888065 1 7734 16,504442 16,730752 0,74 3,14685 5,5489455 7,0384545 1 7736 11,002961 12,7657215 0,85 3,14685 4,2692265 5,24475 1 7737 1,1002961 3,9755205 0,87 1,04895 1,321665 1,4790195 2 7790 709,69099 110,055834 0,74 25,447527 34,625839 43,657299 2 7791 755,90342 111,849539 0,76 28,269203 34,269196 38,003459 2 7792 450,02111 92,150257 0,67 23,89487 27,587385 31,111857 2 7793 393,906 87,933478 0,64 21,839139 25,562912 29,8948 2 7794 1,1002961 3,9755205 0,87 1,04895 1,3321665 1,4790195 2 7796 2,2005922 5,9685255	1	7732	9,902665	11,9265615	0,87	3,14685	3,9964995	4,447548
1 7734 16,504442 16,730752 0,74 3,14685 5,5489455 7,0384545 1 7735 6,6017766 10,7727165 0,71 2,0979 3,603388 4,321674 1 7736 11,002961 12,7657215 0,85 3,14685 4,2692265 5,244752 2 7790 709,69099 110,05834 0,74 25,447527 34,625839 43,657299 2 7790 709,69099 110,849539 0,76 23,989487 27,87385 31,111857 2 7792 450,02111 92,150257 0,67 23,989487 27,587385 31,111857 2 7793 393,906 87,933478 0,64 21,839139 25,562912 29,98948 2 7794 22,005922 18,965016 0,77 4,1958 6,2412525 7,636366 2 7795 1,1002961 3,9755205 0,78 1,04895 1,93005 2,349648 2 7797 8,8023688 12,1783095	1	7733	6,6017766	11,349639	0,64	2,0979	3,7447515	4,6888065
1 7735 6,6017766 10,7727165 0,71 2,0979 3,608388 4,321674 1 7736 11,002961 12,7657215 0,85 3,14685 4,2692265 5,24475 2 7790 709,69099 110,055834 0,74 25,447527 34,625839 43,657299 2 7791 755,90342 111,849539 0,76 28,269203 34,269196 38,003459 2 7792 450,02111 92,150257 0,67 23,989487 27,587385 31,111857 2 7793 33,906 87,933478 0,64 21,839139 25,56212 29,8944 2 7794 22,005922 18,965016 0,77 4,1958 6,2412525 7,636356 2 7795 1,1002961 3,9755205 0,78 1,04895 1,3321665 1,4790195 2 7796 2,2005922 5,966255 0,78 1,04895 4,52443 5,937057 2 7798 8,1023688 17,1780395 <	1	7734	16,504442	16,730752	0,74	3,14685	5,5489455	7,0384545
1 7736 11,002961 12,7657215 0,85 3,14685 4,2692265 5,24475 1 77737 1,1002961 3,9755205 0,87 1,04895 1,3321665 1,4790195 2 7790 709,69099 110,055834 0,74 25,447527 34,625839 43,657299 2 7792 450,02111 92,150257 0,67 23,989487 27,587385 31,111857 2 7794 22,005922 18,965016 0,77 4,1958 6,2412525 7,636356 2 7795 1,1002961 3,9755205 0,87 1,04895 1,9320165 1,4790195 2 7796 2,2005922 5,9685255 0,78 1,04895 1,93005 2,349648 2 7797 8,802368 12,1783095 0,75 3,14685 4,0174785 4,6888065 2 7798 11,002961 13,5839025 0,76 2,9685285 4,55243 5,937057 2 7799 3,300883 7,3741185	1	7735	6,6017766	10,7727165	0,71	2,0979	3,608388	4,321674
1 7737 1,1002961 3,9755205 0,87 1,04895 1,3321665 1,4790195 2 7790 709,69099 110,055834 0,74 25,447527 34,625839 43,657299 2 7791 755,90342 111,849539 0,67 28,269203 34,269196 38,003459 2 7792 450,02111 92,150257 0,67 23,989487 27,587385 31,111857 2 7793 393,906 87,933478 0,64 21,839139 25,562912 29,98948 2 7794 22,005922 18,965016 0,77 4,1958 6,2412525 7,636356 2 7796 2,2005922 5,9685255 0,78 1,04895 1,933005 2,349648 2 7797 8,8023688 1,21783095 0,75 3,14685 4,0174785 4,688065 2 7798 3,300883 7,3741185 0,76 2,0979 2,4650325 2,9685285 2 7800 18,705034 17,559423	1	7736	11,002961	12,7657215	0,85	3,14685	4,2692265	5,24475
27790709,69099110,0558340,7425,44752734,62583943,65729927791755,90342111,8495390,7628,26920334,26919638,00345927792450,0211192,1502570,6723,98948727,58738531,11185727793393,90687,9334780,6421,83913925,56291229,989482779422,00592218,9650160,774,19586,24125257,636356277951,10029613,97552050,871,048951,33216651,4790195277972,20059225,96852550,781,048951,33216651,4790195277978,802368812,17830950,753,146854,01747854,688065277993,30088837,37411850,762,09792,46503252,9685285277993,30088837,37411850,762,09792,46503252,96852852779018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,713282780018,70503417,5594230,6224,82864728,66710433,167799278021051,8831124,3635120,6536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,79369252780464,9	1	7737	1,1002961	3,9755205	0,87	1,04895	1,3321665	1,4790195
27791755,90342111,8495390,7628,26920334,26919638,00345927792450,0211192,1502570,6723,98948727,58738531,11185727793393,90687,9334780,6421,83913925,56291229,989482779422,00592218,9650160,774,19586,24125257,636356277951,10029613,97552050,871,048951,33216651,4790195277962,20059225,96852550,781,048951,9930052,3496482777978,802368812,17830950,753,146854,01747854,6888065277993,3008837,37411850,762,09792,46503252,96852852778018,705034117,5594230,765,19230255,7062886,713282780018,705034112,43635120,8536,97548739,2024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,306650,696,93711,276212513,79369253780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,9682550,781,048951,930052,349648378093,300883 <td< th=""><td>2</td><td>7790</td><td>709,69099</td><td>110,055834</td><td>0,74</td><td>25,447527</td><td>34,625839</td><td>43,657299</td></td<>	2	7790	709,69099	110,055834	0,74	25,447527	34,625839	43,657299
27792450,0211192,1502570,6723,98948727,58738531,11185727793393,90687,9334780,6421,83913925,56291229,989482779422,00592218,9650160,774,19586,24125257,636356277962,20059225,96852550,781,048951,33216651,4700195277962,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648277978,802368812,17830950,753,146854,01747854,68880652779811,00296113,58390250,752,96852854,5524435,937057277993,3008837,37411850,762,09792,46503252,96852852780018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,7132827801448,9208195,548560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,79369252780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,41607653780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378082,2005922 </th <td>2</td> <td>7791</td> <td>755,90342</td> <td>111,849539</td> <td>0,76</td> <td>28,269203</td> <td>34,269196</td> <td>38,003459</td>	2	7791	755,90342	111,849539	0,76	28,269203	34,269196	38,003459
27793393,90687,9334780,6421,83913925,56291229,989482779422,00592218,9650160,774,19586,24125257,636356277951,10029613,97552050,871,048951,33216651,4790195277962,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648277978,802368812,17830950,753,146854,01747854,66880652779811,00296113,58390250,752,96852854,5524435,937057277993,30088837,37411850,762,09792,46503252,96852852780018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,7132827801448,9208195,5488560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,6536,97548739,22024140,8775812780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,9685285378093,30088837,37411850,762,09792,6643332,9685285378074,4011844<	2	7792	450,02111	92,150257	0,67	23,989487	27,587385	31,111857
2779422,00592218,9650160,774,19586,24125257,636356277951,10029613,97552050,871,048951,33216651,4790195277962,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648277978,802368812,17830950,753,146854,01747854,68880652779811,00296113,58390250,752,96852854,5524435,937057277993,30088837,37411850,762,09792,46503252,96852852780018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,71328278011448,9208195,5488560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,79369253780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,41607653780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378093,3008837,37411850,762,09792,6643332,9685285378093,3088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975<	2	7793	393,906	87,933478	0,64	21,839139	25,562912	29,98948
277951,10029613,97552050,871,048951,33216651,4790195277962,20059225,96852550,781,048951,930052,349648277978,802368812,17830950,753,146854,01747854,68880652779811,00296113,58390250,752,96852854,5524435,937057277993,30088837,37411850,762,09792,46503252,96852852780018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,7132827801448,9208195,5488560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,872,09792,6643332,9685285378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378093,3008837,37411850,762,09792,6643332,9685285378093,3088837,37411850,762,09792,6643332,968528537810733,89751	2	7794	22,005922	18,965016	0,77	4,1958	6,2412525	7,636356
277962,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648277978,802368812,17830950,753,146854,01747854,68880652779811,00296113,58390250,752,96852854,5524435,937057277993,30088837,37411850,762,09792,46503252,96852852780018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,7132827801448,9208195,5488560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,300650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,5528,13283942,24121753,65379337810733,8975	2	7795	1,1002961	3,9755205	0,87	1,04895	1,3321665	1,4790195
277978,802368812,17830950,753,146854,01747854,68880652779811,00296113,58390250,752,96852854,5524435,937057277993,30088837,37411850,762,09792,46503252,96852852780018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,7132827801448,9208195,5488560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,65379337810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,30384	2	7796	2,2005922	5,9685255	0,78	1,04895	1,993005	2,349648
2779811,00296113,58390250,752,96852854,5524435,937057277993,30088837,37411850,762,09792,46503252,96852852780018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,7132827801448,9208195,5488560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,65379337810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,3038494<	2	7797	8,8023688	12,1783095	0,75	3,14685	4,0174785	4,6888065
277993,30088837,37411850,762,09792,46503252,96852852780018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,7132827801448,9208195,5488560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,34964837810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,3776163781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	2	7798	11,002961	13,5839025	0,75	2,9685285	4,552443	5,937057
2780018,70503417,5594230,765,19230255,7062886,7132827801448,9208195,5488560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	2	7799	3,3008883	7,3741185	0,76	2,0979	2,4650325	2,9685285
27801448,9208195,5488560,6224,82864728,86710433,167799278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	2	7800	18,705034	17,559423	0,76	5,1923025	5,706288	6,71328
278021051,8831124,3635120,8536,97548739,22024140,8775812780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	2	7801	448,92081	95,548856	0,62	24,828647	28,867104	33,167799
2780315,404145422,7097680,382,09797,458034510,54194752780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	2	7802	1051,8831	124,363512	0,85	36,975487	39,220241	40,877581
2780464,9174734,3006650,696,293711,276212513,793692527805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	2	7803	15,4041454	22,709768	0,38	2,0979	7,4580345	10,5419475
27805391,7054178,4299920,817,8321525,66780731,1852843780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	2	7804	64,91747	34,300665	0,69	6,2937	11,2762125	13,7936925
3780614,303849417,5594230,583,146855,7272677,4160765378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	2	7805	391,70541	78,429992	0,8	17,83215	25,667807	31,185284
378074,40118447,96153050,872,09792,6643332,9685285378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	3	7806	14,3038494	17,559423	0,58	3,14685	5,727267	7,4160765
378082,20059225,96852550,781,048951,9930052,349648378093,30088837,37411850,762,09792,46503252,968528537810733,8975136,048820,528,13283942,24121753,6537933781167,11806235,9475160,658,905585510,82516413,426563781214,303849415,5664180,743,146855,1608346,377616378132138,9756233,118650,4945,56638865,61182380,674744	3	7807	4,4011844	7,9615305	0,87	2,0979	2,664333	2,9685285
3 7809 3,3008883 7,3741185 0,76 2,0979 2,4650325 2,9685285 3 7810 733,8975 136,04882 0,5 28,132839 42,241217 53,653793 3 7811 67,118062 35,947516 0,65 8,9055855 10,825164 13,42656 3 7812 14,3038494 15,566418 0,74 3,14685 5,160834 6,377616 3 7813 2138,9756 233,11865 0,49 45,566388 65,611823 80,674744	3	7808	2,2005922	5,9685255	0,78	1,04895	1,993005	2,349648
3 7810 733,8975 136,04882 0,5 28,132839 42,241217 53,653793 3 7811 67,118062 35,947516 0,65 8,9055855 10,825164 13,42656 3 7812 14,3038494 15,566418 0,74 3,14685 5,160834 6,377616 3 7813 2138,9756 233,11865 0,49 45,566388 65,611823 80,674744	3	7809	3,3008883	7,3741185	0,76	2,0979	2,4650325	2,9685285
3 7811 67,118062 35,947516 0,65 8,9055855 10,825164 13,42656 3 7812 14,3038494 15,566418 0,74 3,14685 5,160834 6,377616 3 7813 2138,9756 233,11865 0,49 45,566388 65,611823 80,674744	3	7810	733,8975	136,04882	0,5	28,132839	42,241217	53,653793
3 7812 14,3038494 15,566418 0,74 3,14685 5,160834 6,377616 3 7813 2138,9756 233,11865 0,49 45,566388 65,611823 80,674744	3	7811	67,118062	35,947516	0,65	8,9055855	10,825164	13,42656
3 7813 2138,9756 233,11865 0,49 45,566388 65,611823 80,674744	3	7812	14,3038494	15,566418	0,74	3,14685	5,160834	6,377616
	3	7813	2138,9756	233,11865	0,49	45,566388	65,611823	80,674744
3 7814 47,312732 26,926547 0,82 7,34265 8,8216695 10,4790105	3	7814	47,312732	26,926547	0,82	7,34265	8,8216695	10,4790105
3 7815 354,29534 90,84956 0,54 19,730749 26,402072 32,842625	3	7815	354,29534	90,84956	0,54	19,730749	26,402072	32,842625



Anlage 14. Porositä	it und Porenmesswerte am	Beispiel beim	steigenden	Gießen mit Disopast	6369/10,
0		1		1	

Feld	Objekt	Fläche	Umfang	Formfaktor	MinFeret	MittFeret	MaxFeret
1	7198	11,00296103	14,748237	0,64	3,14685	4,8566385	6,1153785
1	7199	209,05626	92,349558	0,31	7,34265	29,276195	42,073385
1	7200	2256,7073	324,82835	0,27	52,625821	73,520906	88,510401
1	7201	12,1032571	14,160825	0,76	3,14685	4,6888065	5,643351
1	7202	14,3038494	14,160825	0,9	4,1958	4,741254	5,24475
1	7203	19,80533	24,356619	0,42	3,14685	7,6468455	10,69929
1	7204	6,6017766	10,195794	0,8	2,9685285	3,4090875	3,77622
1	7205	5,5014805	9,3671235	0,79	2,0979	3,1363605	3,77622
1	7206	4,4011844	7,9615305	0,87	2,0979	2,664333	2,9685285
1	7207	1,1002961	3,9755205	0,87	1,04895	1,3321665	1,4790195
1	7208	30,808291	27,985986	0,49	5,9685255	8,286705	10,4790105
1	7209	1,1002961	3,9755205	0,87	1,04895	1,3321665	1,4790195
2	7256	2417,3505	254,45429	0,47	50,748201	71,727201	85,37404
2	7257	146,33938	48,702748	0,78	11,53845	15,985998	18,314667
2	7258	1157,5115	175,04878	0,47	37,12234	45,839115	52,971975
2	7259	2255,607	324,34583	0,27	53,108339	73,489437	89,16075
2	7260	9,902665	12,7657215	0,76	3,14685	4,216779	5,24475
2	7261	13,2035532	14,160825	0,83	4,1958	4,6888065	5,24475
2	7262	20,905626	20,370609	0,63	4,1958	6,692301	8,958033
2	7263	2,2005922	5,9685255	0,78	1,04895	1,993005	2,349648
2	7264	6,6017766	10,7727165	0,71	2,853144	3,545451	4,447548
2	7265	3,3008883	7,3741185	0,76	2,0979	2,4650325	2,9685285
2	7266	2,2005922	5,9685255	0,78	1,04895	1,993005	2,349648
2	7267	29,707995	27,503469	0,49	3,14685	9,0943965	12,629358
2	7268	12,1032571	13,342644	0,85	3,14685	4,468527	5,24475
2	7269	2942,1918	323,82136	0,35	52,4475	87,723688	115,17471
3	7270	14,3038494	18,136345	0,55	4,153842	5,9475465	7,5629295
3	7271	714,09217	123,304072	0,59	26,43354	36,167796	42,314643
3	7272	45,11214	24,356619	0,96	7,34265	8,160831	9,02097
3	7273	192,55182	64,846089	0,58	14,433552	19,730749	24,576899
3	7274	105,628426	42,975482	0,72	9,524466	13,615371	16,279704
3	7275	1,1002961	3,9755205	0,87	1,04895	1,3321665	1,4790195
3	7276	4,4011844	8,7797115	0,72	2,0979	2,93706	3,77622
3	7277	11,002961	14,1713145	0.69	3,524472	4,678317	5,937057
3	7278	1,1002961	3,9755205	0.87	1,04895	1,3321665	1,4790195
3	7279	732,7972	182,80052	0.28	26,937036	36,629334	45,272682
3	7280	14,3038494	20,129351	0.44	2,0979	6,4720215	8,6538375
3	7281	6386,1186	311,3913	0.83	90,335574	95,590813	103,311085
3	7282	1536,0134	236,30746	0,35	44,118837	58,583858	72,723704

Unterdruck und Ar-Behandlung





Anlage 15. Dichtewerte am Beispiel beim fallenden Gießen ohne Schlichte und mit Unterdruck



Anlage 16. Dichtewerte am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 5000



Anlage 17. Dichtewerte am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 5000 und Unterdruck



Anlage 18. Dichtewerte am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 6369/10



Anlage 19. Dichtewerte am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 6369/10 und Unterdruck

Anlage 20. Dichtewerte am Beispiel beim fallenden Gießen mit Disopast 6369/10, Unterdruck und Ar-Behandlung

