



University of Leoben
Chair of Casting Research
Department of Metallurgy
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter Schumacher



Masterarbeit

Potential alternativer Formstoffe zur Kernherstellung

Erstellerin

Olga Geraseva, BSc.

Betreuer

Dipl.-Ing. Huber Kerber

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter Schumacher

Leoben, Oktober 2016

Statutory Declaration

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Datum

Olga Geraseva

Danksagung

An dieser Stelle sei es mir erlaubt, all jenen zu danken, welche mir in den Jahren meines Studiums und für die Erstellung dieser Masterarbeit fachlich und persönlich zur Seite gestanden sind.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, vor allem meinen Eltern, die mir dieses Studium an der Montanuniversität Leoben ermöglicht haben. Zu Dank verpflichtet bin ich auch meinem Zwillingbruder, der mich in allen Lebenslagen unterstützt hat. Ein besonderer Dank gilt meinem Freund, er ist der beste organische "Binder".

Des weiteren gilt ein großes Dankeschön Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Peter Schumacher und Dipl.-Ing. Hubert Kerber für die Betreuung dieser Arbeit. Ebenso möchte ich den Mitarbeitern des Österreichischen Gießerei-Institutes und des Lehrstuhls für Gießereikunde für die Zusammenarbeit danken.

Schließlich möchte ich mich auch bei Dr. Erika Augustin, Cornelia Praschag und meinen Leobener Freunden (internationale "Mafia"), für Unterstützung, Beistand und die tolle gemeinsame Zeit in Leoben während des Studiums bedanken.

Abstract

Quarzsand is the most commonly moulding material used in casting technologies. Low commodity prices, good technical properties and easy availability make it very attractive to most foundries. Constantly increasing customer demands on the casting surface of increasingly complex castings provoke to think of alternative moulding materials. Furthermore, the availability of natural high-purity quartz-sand is limited. The purity has great influence on the physical properties and hence on the quality of the sand. In the foreseeable future rising prices are to be expected.

The aim of this thesis is to identify potential alternative moulding materials, the investigation of their properties and their influence on the casting. Furthermore of interest are the mechanical properties of different core-sand mixtures and their impact on the solidification behaviour.

Bauxite-, chromite-, zircon-sand, as well as metal granules and mixtures of metal granules with silica- and zircon sand were tested to examine their mechanical properties. Tests of the bending strength were therefore performed to determine the mechanical properties of the samples.

The investigation of metal granules was of special interest. The influence on the solidification behaviour was determined by casting trials which were executed with the aluminium alloy as well as ductile cast iron.

In summary, Bauxite- and Zirkonium-sand stand out with their very high form stability, especially when using optimized grain size distribution. However, by core shooting, metal granules are problematical during filling of core moulds. Nevertheless their bending strength is similar to the one of quartz-sand-mixtures. Notable is their quenching effect during casting. It results in a very hard surface of the cast parts in the case of ductile cast iron and with a locally decreased dendritic arm spacing in Al-alloys.

Kurzfassung

Quarzsand ist der mit Abstand am häufigsten verwendete Formgrundstoff in der Gießereiindustrie. Niedrige Rohstoffpreise, gute technische Eigenschaften und leichte Verfügbarkeit machen ihn für die meisten Gießereien sehr attraktiv. Ständig steigende Kundenanforderungen an die Gussoberfläche bei immer komplexeren Gussstücken lassen aber über Alternativen bei der Formgrundstoffwahl nachdenken. Weiters ist die natürliche Verfügbarkeit von hochreinem Quarzsand beschränkt. Die Reinheit hat großen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften und somit auf die Qualität des Sandes. Daher ist in absehbarer Zukunft ein Preisanstieg zu erwarten.

Ziel dieser Arbeit ist die Identifizierung möglicher, alternativer Formgrundstoffe, die Untersuchung ihrer Eigenschaften und deren Einfluss auf das Gussstück. Dabei stehen die mechanischen Eigenschaften verschiedener Kernsandmischungen und deren Einwirken auf das Erstarrungsverhalten im Fokus.

Erprobt wurden Bauxitsand, Chromitsand, Zirkonsand sowie Metallgranulat und Mischungen von Metallgranulat mit Quarzsand und Zirkonsand, hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften. Zur Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit wurden Biegefestigkeitsversuche durchgeführt.

Metallgranulat als Formgrundstoff im Kern ist von besonderem Interesse, da potentiell auch verbesserte Abkühleigenschaften erwartet werden können. Der Einfluss auf das Erstarrungsverhalten wurde ermittelt, in dem Gießversuche mit Aluminiumlegierung und mit duktilem Gusseisen mit Kugelgraphit unternommen wurden.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden: Bauxitsand und Zirkonsand ergeben mechanisch feste Formgrundstoffe, vor allem bei optimierter Korngrößenverteilung. Jedoch sind Metallgranulate etwas problematisch in der Handhabung beim Befüllen der Kernkästen. Ihre Festigkeitswerte liegen im Bereich des Quarzsandes. Bemerkenswert ist aber ihre Schreckwirkung beim Gießen und die daraus resultierende, sehr harte Oberfläche der Gussteile im Fall des duktilen Gusseisens, beziehungsweise im lokal geringeren Dendritenarmabstand bei Al-Legierungen.

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	- 7 -
2	Theoretischer Hintergrund.....	- 8 -
2.1	Formherstellung und Kernherstellung	- 10 -
2.2	Klassische Formgrundstoffe - Quarzsand	- 12 -
2.3	Beispiele alternativer Formgrundstoffe.....	- 13 -
2.3.1	Mineralische Spezialsande	- 14 -
2.3.2	Metallgranulate	- 15 -
2.4	Bindersysteme.....	- 17 -
2.4.1	Anorganisches System	- 17 -
2.4.2	Organisches System.....	- 20 -
2.4.2.1	Furan-Kaltharz Verfahren.....	- 20 -
2.4.2.2	Phenolharz Verfahren	- 21 -
2.4.2.3	Cold-Box Verfahren	- 22 -
2.4.2.4	Warm-Box- und Hot-Box-Verfahren	- 23 -
2.5	Auswirkung der Abkühlbedingungen auf das Gefüge.....	- 24 -
2.5.1	Konstitutionelle Unterkühlung:	- 24 -
2.5.2	Dendritenarmabstand:	- 27 -
2.6	Abkühlbedingungen von Aluminiumlegierungen	- 29 -
2.7	Abkühlbedingungen von Gusseisen.....	- 30 -
3	Versuchsdurchführung	- 31 -
3.1	Untersuchung der mechanische Belastbarkeit.....	- 32 -
3.1.1	Korngrößenverteilung	- 32 -
3.1.2	Herstellung der Probenkörper	- 32 -
3.1.3	Prüfung der Kernsandproben.....	- 36 -
3.2	Gießversuche	- 38 -
3.2.1	Lichtmikroskopie	- 42 -
3.2.2	Gefügebrauchauswertungen.....	- 43 -

3.2.3 Rasterelektronenmikroskopie.....	- 44 -
3.2.4 Härteprüfung.....	- 45 -
3.2.5 Metallgranulat Regenerierung.....	- 46 -
4 Resultate.....	- 47 -
4.1 Korngrößenverteilung.....	- 47 -
4.2 Rasterelektronenmikroskopie.....	- 48 -
4.3 Biegefestigkeitsprüfungen von klassischen Quarzsand-Kernen mit Cold-Box-Härtung.....	- 52 -
4.4 Biegefestigkeitsprüfungen von alternativen Formstoffen – Chromitsand-, Zirkonsand- und Bauxitsand-Kerne mit Cold-Box-Härtung.....	- 58 -
4.5 Biegefestigkeitsprüfungen von alternativen metallischen Formstoffen – Metallgranulat-Kerne mit Cold-Box-Härtung.....	- 63 -
4.6 Vergleich von Biegefestigkeitsprüfungen Quarzsand-Kerne und Metallgranulat-Kerne mit Warm-Box-Härtung.....	- 68 -
4.7 Biegefestigkeitsprüfungen von Metallgranulat-Regenerat-Kerne mit Cold-Box-Härtung.....	- 71 -
4.8 Abgüsse von Aluminiumlegierung - mit klassischen Quarzsand-Kernen und alternativen Metallgranulat-Kernen.....	- 73 -
4.9 Abgüsse von Gusseisen mit kugeligem Graphit - mit klassischen Quarzsand-Kernen und alternativen Metallgranulat-Kernen.....	- 75 -
4.10 Härteverlauf von Gusseisenproben mit klassischen und alternativen Kernen.....	- 76 -
5 Diskussion der Ergebnisse.....	- 78 -
5.1 Biegefestigkeit.....	- 78 -
5.2 Einfluss von Abkühlbedingung von Kernen auf das Aluminiumgussgefüge.....	- 82 -
5.3 Einfluss von Abkühlbedingung von Kernen auf das Gusseisengefüge.....	- 85 -
6 Zusammenfassung.....	- 88 -
Literatur.....	- 89 -
Abbildungsverzeichnis.....	- 92 -
Tabellenverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis.....	II

1 Einleitung

In den meisten Gießereien verwendet man als Formgrundstoff Quarzsand. Niedrige Rohstoffpreise, gute technische Eigenschaften und leichte Verfügbarkeit machen ihn für die meisten Gießereien sehr attraktiv. Es gibt aber noch eine große Anzahl von alternativen Materialien, die auch als Formgrundstoff denkbar wären. Dazu zählen unter anderem synthetischer Sand, Metallgranulat oder mineralische Sande, die nicht aus Quarz bestehen. Jedes Material besitzt spezifische eigene physikalische und chemische Eigenschaften, die das Gießverhalten beeinflussen. Des Weiteren nehmen darauf auch Parameter wie Packungsdichte, Kornform und Körngrosse Einfluss.

Ein wichtiger Faktor bei der Auswahl eines Formstoffes, ist die Wärmeleitfähigkeit. Je höher diese ist, desto feiner ist das Gefüge des Gussstückes. Natürlich ist die Wärmeleitfähigkeit z.B. bei Metallgranulat-Kernen weitaus höher als bei mineralischen Kernen. Dies ist bei Sand-Kernen ein häufiges Problem, wo oft gröbere Gefüge zu beobachten sind.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss auf das Gießverhalten, insbesondere das Gefüge des Werkstückes und die Wärmeleitfähigkeit von alternativen Formgrundstoffen in Kombination mit einem klassischen Binder zu untersuchen.

Als Bewertungskriterien für die getesteten alternativen Formgrundstoffe wurden die mechanische Belastbarkeit der Kerne und deren Einfluss auf die Mikrostruktur des Gussstückes gewählt. Im Zuge der Versuchsdurchführung wurden daher Kerne aus Bauxit-, Chromit-, Zikonsand und Metallgranulat mit klassischen Bindersystemen hergestellt. Diese wurden auf Biegefestigkeit getestet und mit klassischen Quarzsand-Mischungen verglichen.

Der Einfluss auf die Mikrostruktur von Gussteilen wurde durch Giessversuche mit einer Aluminiumlegierung und Gusseisen mit Kugelgraphit untersucht. Außerdem wurde die Formfestigkeit, das Entkernungsverhalten sowie das Erstarrungsverhalten der Gussteile verglichen.

Für den jeweiligen Praxisfall kann auf Grund der hier gewonnenen Ergebnisse, unter Einbeziehung kaufmännischer Aspekte, ein geeigneterer Formgrundstoff gefunden werden.

2 Theoretischer Hintergrund

Gießen ist vermutlich die älteste Art der Formgebung metallischer Werkstoffe und blickt auf rund 5000 Jahre Geschichte zurück. In diesem langen Zeitraum haben sich die Materialien und Techniken stark weiterentwickelt und sind zu einem eigenen Spezialgebiet der Metallurgie geworden [1].

Formgrundstoffe haben in der Regel, auf Grund ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften, keine Binder Funktion. Hauptbestandteil jedes Formstoffes ist üblicherweise Sand, der als Füllstoff den Formgrundstoff darstellt [2].

Die Bestandteile des Systems Formstoff sind **85-98% Formgrundstoff**, **2-10% Formstoffbinder** und **weitere Zusatzstoffe** zu Verbesserung der Gießereigenschaften (Abb. 2-1).

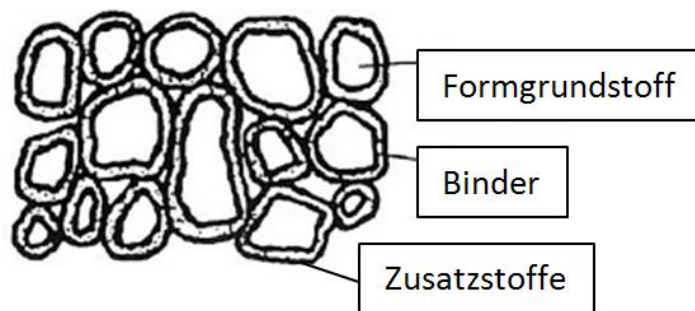


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung Formstoff [3].

Sand, bzw. ein granuliertes Grundmaterial, ist mit 85-98% der Hauptbestandteil des Formstoffes. Je nach verwendetem Formgrundstoff und Bindertyp liegt der Binderanteil bei 2-10% (Abb. 2-1). Als Sande werden mineralische oder synthetische Granulate bezeichnet. An die in der Gießerei verwendeten Sande werden bestimmte Grundvoraussetzungen gestellt. Die Eigenschaften der Sandformstoffe werden durch die Anzahl der Binderbrücken (Einflussfaktoren: mittlere Kornzahl, Rauigkeit, Binderanteil) und die Stärke der Binderbrücken (Einflussfaktoren: Bindertyp, Größe, Benetzung) beeinflusst. Oft müssen sie eine hohe Sinterbeständigkeit, gute Temperaturwechselbeständigkeit und eine geringe thermische Ausdehnung aufweisen. Des Weiteren muss der Sand ein nahezu inertes Verhalten gegenüber den verwendeten Schmelzen besitzen.

Sand ist hier als Kollektiv von Körnern, vorwiegend im Korngrößenbereich 0,063 bis 1,50 mm zu verstehen. Wie bereits erwähnt kann nicht nur Quarzsand als Formgrundstoff benutzt werden, sondern auch Alternative Formstoffe, wie Chromitsand, Zirkonsand, Olivinsand, Bauxitsand, Schamotte oder Metallgranulat [4].

Die Binder können organischer oder anorganischer Natur sein. Die anorganischen Binder unterscheiden sich in natürliche und synthetische. In den Bereich der natürlichen Binder fallen Tone, wie Montmorillonit oder Kaolinit. Als synthetische anorganische Binder werden Wasserglas, Gips oder Zement verwendet. Für die chemisch gebundenen Sande werden als organische Binder hauptsächlich Kunstharze, wie Phenol-, Furan-, und Epoxidharze, eingesetzt. Die organischen Binder wurden im Jahre 1943 von Croning zum ersten Mal als Kunstharz-Sandgemisch eingesetzt. Hieraus entwickelten sich im Laufe der Jahre verschiedene Bindesysteme auf Kunstharzbasis [5].

In der Gießereiindustrie werden unterschiedlichste Formverfahren benutzt. Die Auswahl eines Formverfahrens hängt von mehreren Faktoren ab. Ein wichtiger Faktor ist das herzustellende Gussstück (Werkstoff, Gewicht, Wanddicke, Höhe) und demzufolge die auf den Formstoff einwirkende Wärmemenge und der Gießdruck. Ein weiterer Faktor ist die zu fertigende Stückzahl [6].

Form- und Kernsande unterscheiden sich durch die in ihrer Verwendung geforderten Eigenschaften (siehe Tabelle 2-1) [7]:

Tabelle 2-1: Die wichtigsten Anforderungen und Eigenschaften von Form- und Kernsanden [7].

Formsande	Kernsande
<ul style="list-style-type: none"> • Homogene Aufbereitung, • Verformbarkeit (Fließbarkeit, Plastizität, Verdichtbarkeit), • mechanische Festigkeit im verdichteten Zustand, • Masshaltigkeit beim Abheben des Modells und beim Gießen, • Gasdurchlässigkeit, • Feuerbeständigkeit, • Thermische Widerstandsfähigkeit (Erosionseigung, Ausdehnungsfehlerneigung, • Reaktionsbereitschaft mit dem Gießmetall, • Wiederaufbereitbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitbarkeit (Handstampfen, Blasen, Schiessen), • Grünstandfestigkeit, • Aushärtvorgang und – geschwindigkeit, • Festigkeit nach dem Aushärten, • Thermische Widerstandsfähigkeit, • Reaktionsbereitschaft mit dem Gießmetall, • Zerfallsfähigkeit, • Beeinflussung des Sandkreislaufsystems

2.1 Formherstellung und Kernherstellung

Flemming und Tilch definieren [1]: „Als Formen bezeichnet man das Abbilden von Hohlräumen in Formstoffen bzw. metallischen Werkstoffen (Kokillen) mit solcher Gestalt und Abmessung, dass nach dem Erstarren und Abkühlen des flüssigen Metalls in der Form das geforderte Gussstück vorliegt. Als Formverfahren werden alle Technologien bezeichnet, die zur Herstellung eines Formteils bzw. einer kompletten Form mit dem entsprechenden Formhohlraum für die Aufnahme des flüssigen Metalls eingesetzt werden.“

Formen und Kerne werden nach der Möglichkeit der Wiederverwendung eingeteilt: zum einmaligen Gebrauch, diese werden als verlorene Formen/Kerne bezeichnet und Dauerformen (Dauerkerne), die zum mehrmaligen Abgießen, aber hier nicht betrachtet werden. In Tabelle 2-2 sind alle gängig verwendeten Formverfahren angeführt.

Tabelle 2-2: Alle Formverfahren mit Sandmischungen [18].

Formverfahren mit tongebundenen Formsanden	
	Verfahren mit feuchten tongebundenen Formsanden
	Verfahren mit luftgetrockneten Formen
	Verfahren mit ofengetrockneten Formen
	Lehm-Formverfahren
	Schamotte-Formverfahren
Formverfahren mit Wasserglasgebundenem Sand	
	Kohlensäure-Erstarrungsverfahren (CO ₂ -Verfahren)
	Verfahren mit selbsthärtenden Wasserglas-Sanden
Zementsand – Formverfahren	
	Zementsand-Verfahren
	Zement-Fließsand-Verfahren
	Schnellbindendes Zementsand-Verfahren
Formverfahren mit Erstarrungsölsanden	
Formverfahren mit Öl- und emulsionsgebundenen Sanden	
Formverfahren mit kalthärtenden kunstharzgebundenen Sanden	
	Kaltharzsand-Verfahren (No-Bake-Verfahren)
	Schnellbindeharzsand-Verfahren
	Cold-Box-Verfahren
	SO ₂ -Verfahren
Formverfahren mit heißhärtenden kunstharzgebundenen Sanden	
	Maskenformverfahren
	Hot-Box-Verfahren
Gefrierformverfahren (Verfahren mit Eis als Binder)	
Genaugießverfahren	
	Keramikformverfahren (Shaw-Verfahren)
	Unicast-Verfahren
	Verfahren mit Stützform (Composite-Shaw-Verfahren)
	Gipsformverfahren
Feingießverfahren (Modellausschmelzverfahren)	
Vollform-Gießverfahren	
Magnet-Formverfahren	
Vakuum-Formverfahren	

Kernschießen, Kernblasen und Kernpressen sind die drei wichtigsten Kernherstellungsverfahren. Beim Kernschießen wird der Kernsand mit Luftdruck (3-8 bar) schussartig in eine Form eingebracht. Beim Kernblasen wird ein Formstoff-Luftgemischt in den Kernkasten geblasen. Bei Kernpressen wird der Sand durch Pressen verdichtet. Für Kleinserien werden vorwiegend Holzkernkästen verwendet, für Großserien und Verfahren mit Wärmeeinwirkung werden meist Metallkernkästen verwendet. Nach der Füllung und Verdichtung des Formstoffs im Kernkasten erfolgt die Härtung. Diese wird durch thermische Härtung (Hot-Box-Verfahren, Maskenformverfahren) oder durch Begasung bei Raumtemperatur (Cold-Box-, CO₂- und SO₂-Verfahren) erreicht. Außerdem gibt es einige Sonderformen wie kaltharz-, ölsand- oder bentonitgebundenen Sand. Das Ausschalen erfolgt, je nach Kernformverfahren bzw. erreichter Auspackfestigkeit, entweder sofort nach dem Schießen, oder der Kern wird im Kernkasten belassen und erst nach der Härtung ausgeschalt. Die Kerne müssen Bauteilkonturen formen. Deswegen muss ein gewisser Widerstand gegen Erosion beim Formfüllen, eine gewisse Formbeständigkeit gegen metallostatistischen Druck der Schmelze und eine gute Entfernbarekeit gewährleistet sein. Ein allgemeines Problem von Formen ist der Gasstoß, der beim ersten Kontakt der heißen Schmelze mit dem Kern entsteht. Die hier entstehenden Kondensations- bzw. Verbrennungsgase, müssen über die Kerne abgeführt werden [8].

2.2 Klassische Formgrundstoffe - Quarzsand

Quarzsand ist ein Sand, der zum überwiegenden Teil aus Quarz besteht (ca. 95-99%). Quarz ist die kristalline Form der Kieselsäure und wird aus SiO₄ Tetraedern aufgebaut, die sich mit ihren Nachbarn zu einem dreidimensionalen Gitter verbinden. Die chemische Summenformel lautet: SiO₂. Die physikalischen Eigenschaften, insbesondere die Schmelztemperatur, hängt stark von der Reinheit des Sandes ab.

Quarz hat einen Schmelzpunkt von 1713°C, er kann kostengünstig an natürlichen Lagerstätten abgebaut werden und ist mit den meisten Bindersystemen kompatibel. Diese Vorteile machen ihn zum am weitest verbreiteten Formgrundstoff [9].

SiO₂-Gehalt und Anteil der basischen Komponente sind wichtige Parameter im Eigenschaftskomplex zur gießereitechnologischen Bewertung von klassischen

Formgrundstoffen. Granulometrische Parameter sind Korngrößenanteile, mittlere Korngröße, Oberflächenzustand, Kornform und Korngrößenverteilung des Haufwerkes. Weiters dazu zählen andere Eigenschaften wie Härte der Körner, Dichte und thermische Kennwerte [10].

2.3 Beispiele alternativer Formgrundstoffe

Quarzsand ist auf Grund seines günstigen Preis/Leistungsverhältnisses der am weitesten verbreitete Formgrundstoff. Er hat aber auch einige unerwünschte Eigenschaften. Diese können die Produktion erschweren und die Produktqualität herabsetzen. Quarzsand macht bei Temperaturerhöhung drei Modifikationswechsel durch (bei 573°C, 870°C und 1400°C). Dabei treten auch Dichte- und Längenänderungen auf. Der signifikanteste ist der sogenannte Quarzsprung bei 573°C. Hier findet eine Längenänderung durch den Modifikationswechsel vom Tiefquarz in den Hochquarz statt.

Des Weiteren sind die thermophysikalischen Eigenschaften zu erwähnen, beispielweise die schlechte Wärmeleitfähigkeit, die zu Schwierigkeiten bei der Herstellung von dickwandigen Eisen- oder Stahlgussteilen führen können [8].

Ein dritter Punkt ist sein Hochtemperaturverhalten, das nicht immer optimal ist. Dies zeigt sich in der Sinteranfangstemperatur. Qualitativ hochwertiger Quarzsand beginnt bei 1450 bis 1550°C zu sintern, bei Verunreinigungen kann sich die Sinteranfangstemperatur allerdings verringern. Vor allem die Herstellung von hochschmelzenden Gusslegierungen wie z.B. Stahlgusswerkstoffen ist davon betroffen. Anbrand, Versinterung oder Vererzung sind dabei häufig auftretende Phänomene [11].

Als alternative Formgrundstoffe, können alle Spezialsande verstanden werden. Sande sind natürliche Mineralsande, Sinter- und Schmelzprodukte, die in körniger Form hergestellt, oder durch Mahl-, Brech- und Klassiervorgänge in körnige Form überführt werden. Auch andere, durch chemische oder physikalische Vorgänge entstandenen, anorganischen Aggregate werden als Sande bezeichnet [12]. In der Gießereiindustrie werden alle Sande die nicht zum größten Teil (95%) aus Quarz bestehen als Spezialsande bezeichnet [16].

Je nach Material können gegenüber dem Quarzsand bestimmte Vorteile bestehen [13]:

- Geringeres thermisches Ausdehnungsverhalten im Temperaturbereich von 20-600°C
- Höhere bzw. niedrigere Wärmeleitfähigkeit
- Höhere Feuerfestigkeit, besseres Sinterverhalten
- Vermeidung des Zusatzes von gasbildenden Additiven, Metall-Formstoffreaktionen und Penetration
- Verringerung des Kerngewichtes
- Verbesserung der Fließfähigkeit des Formstoffes
- Beeinflussung der Gefügebildung
- Einfacheres Gießen dünnwandiger Gussteile.

Alternative Formgrundstoffe sollen die Sicherung einer hohen Gussstückqualität durch den Einsatz von Formstoffen mit einem günstigen Ausdehnungsverhalten und hoher thermischer Belastbarkeit begünstigen. Dies dient zur Sicherung einer guten Maßgenauigkeit, Oberflächengüte sowie Fehlerfreiheit (Anbrand, Penetration, Ausdehnungsfehler). Des Weiteren beeinflussen Formstoffe mit variablen wärmephysikalischen Eigenschaften die Wärmeentzugsbedingungen. Die Abkühlungsgeschwindigkeit wird verringert um dünnwandigere Gussteile fertigen zu können. Eine schnelle Abkühlung fördert eine günstige Gefügebildung (z.B. Dendritenarmabstand) im Leichtmetallguss. Ausserdem kann das Verhalten beim Gießen (Fließvermögen) und die Gefügebildung positiv beeinflusst werden [13].

2.3.1 Mineralische Spezialsande

Chromitsand:

Chromitsande werden durch Nassaufbereitung aus Chromerzkonzentraten gewonnen. Anforderungen an das Chromerz sind ein SiO_2 -Gehalt von max. 2,5%, Cr_2O_3 bis 45% und ein Fe_2O_3 -Gehalt von max. 28%. Formstoffe auf Chromitsandbasis weisen auf Grund ihrer geringeren Korngröße, der

Korngroßverteilung und Packungsdichte eine gute Wärmeleitfähigkeit auf, was die Wärmeentzugsgeschwindigkeit erhöht [1,16].

Zirkonsand:

Zirkonsand besteht hauptsächlich aus dem Mineral Zirkon ($ZrSiO_4$). Er wird aus natürlichen Lagerstätten gewonnen. Um ihn als Formstoff verwenden zu können, muss sein Zirkongehalt mindestens 65% betragen.

Er zeichnet sich durch eine glatte Oberfläche, gerundete Kornform, hohe Wärmeleitfähigkeit und geringe thermische Ausdehnung aus. Zirkonsand ist daher thermisch hoch belastbar [1,18].

Bauxitsand:

Bauxit ist ein aluminiumreiches Gestein das durch Verwitterung entsteht und zur Aluminiumgewinnung verwendet werden kann. Der aus diesem Gestein gebrochene Sand findet in der Giesserei immer mehr Verwendung. Er ist sowohl für den Gebrauch in Eisen- als auch in Leichtmetallgießereien geeignet. Durch die beinahe ideale Kugelform der Körner besitzt dieser Sand gute Fließeigenschaften und gute Gasdurchlässigkeit. Außerdem ist dieser Sand billiger als Zirkonsand, aber dennoch teurer als Quarzsand, was eine häufigere Nutzung limitiert. Ein weiterer großer Vorteil ist seine wesentlich geringere thermische Ausdehnung im Vergleich zum Quarzsand. Er kann mit allen gängigen Bindersystemen kombiniert werden, wobei die Bindersparnis bei gleicher Formstofffestigkeit zwischen 35 und 60% beträgt. Die durchschnittliche chemische Zusammensetzung von Bauxit ist 75% Al_2O_3 , bis 12% SiO_2 , bis 5% Fe_2O_3 , bis 4 TiO_2 , unter 1% MgO und CaO [14,15].

2.3.2 Metallgranulate

Das zunehmende wissenschaftliche und anwendungstechnische Interesse an Pulvern mit einer Teilchgröße $<0,1 \mu m$ sowohl für die Entwicklung von Sinterwerkstoffen als auch für andere Zwecke, z.B. magnetische Informationsspeicher oder Katalyse veranlasst verschiedene Methoden wie chemische Methoden, Gasphasenreaktionen oder Verdampfung und Kondensation als Herstellungsverfahren heranzuziehen. Es kommen unterschiedliche

Herstellungsverfahren zur Anwendung, wichtig ist nicht nur die Teilchengröße aber auch Einstellung spezieller, für die Anwendung unerlässliche Eigenschaften.

Mechanische Zerkleinerung ohne Phasenumwandlung:

Das Wirkprinzip der mechanischen Zerkleinerung beruht in der Übertragung mechanischer, im Mahlaggregat erzeugter Bewegungsenergie auf den zu zerkleinernden Festkörper. Die Bewegungsenergie wird in mechanische Spannungen umgesetzt, die auf die Kristallite der Mahlgutteilchen einwirken. Von deren physikalischen Eigenschaften hängt es ab, ob die aufgebrachte Spannung zum Spröbruch führt oder ob der Bruch erst eintritt, nachdem das Umformvermögen des Werkstoffes infolge Kaltverfestigung erschöpft ist.

Mahlbehälter und Mahlkugeln werden in Abhängigkeit von Härte, Mahlbarkeit und geforderter Reinheit des Mahlgutes aus Hartporzellan, unlegiertem Stahl oder Chrom-Nickel-Stahl gefertigt, bzw. werden größere Mahlbehälter auch mit dem hochverschleißfestem, aber teuren Werkstoffen ausgekleidet. In der Regel kommen bereits bei Teilchengrößen unter 2 mm vorzerkleinerte Güter zum Einsatz, die trocken oder auch nass gemahlen werden.

Mechanische Zerkleinung mit Phasenumwandlung:

Die Pulvererzeugung durch Zerteilung einer Schmelze wird in mehreren Varianten genutzt. Zur Herstellung von legierten Massenpulvern wird sie in der Regel als die ökonomischste Methode angesehen. Im Fall von Sonderlegierungen stellt sie die aussichtsreichste Form der Gewinnung von Pulvern mit sehr hoher Reinheit dar. Der Grundsatz des Verfahrens besteht darin, dass eine Schmelze oder ein lokal aufgeschmolzener Werkstoff von strömenden komprimierten Gasen und Flüssigkeiten, von mechanisch bewegten Teilen oder durch Ultraschall in Tröpfchen verteilt wird, die im Zerteilungsmedium oder mit Hilfe zusätzlicher Kühlmittel rasch erstarren. Bei der industriellen Stahlpulvergewinnung durch Wasserverdüsung liegt die Hauptmenge der Teilchen im Größenbereich zwischen 60 und 150 µm.

Granulieren von Pulvern:

Granulation bezeichnet eine Pulverbehandlung, bei der die Primärteilchen des Ausgangspulvers zu sekundären Teilchen agglomerieren. Die wichtigsten Vorteile

der Methode sind: die Füllichte zu erhöhen und Entmischungen während der Weiterverarbeitung zu verhindern sowie nicht fließenden Pulvern gute Fließigenschaften zu verleihen. Die Bindung des Pulvers hängt von der Granulationsmethode ab. Verbreitete Methoden sind das Granulieren mit Hilfe eines Granulationsmittels, mechanische Granulation, thermische Granulation oder eine Kombination dieser Methoden. Sehr feine Pulver (kleiner 5 μm) können durch Sprühtrocknung granuliert werden. Bei der mechanischen Granulation wird das Pulver allein mechanisch verdichtet und der Preßkörper in einer Mühle anschließend wieder zerkleinert. Granulate werden üblicherweise in einem Korngrößenbereich von 0,1 bis 5 mm hergestellt [16,35].

2.4 Bindersysteme

Die Aufgabe von Bindern ist es, der Form die nötige Festigkeit zu verleihen, also der physikalischen Beanspruchung während des Giessen entgegenzuwirken, sodass die abgebildeten Hohlräume ihre Form beibehalten.

Der Binder wird mit dem Formgrundstoff vermischt, so dass er die Körner umhüllt. Berühren sich zwei Körner, kommt es zur Ausbildung von Binderbrücken. Durch die gebildete Kontaktfläche und den vorliegenden kohäsiven Kräften, aufgrund der Verfestigungsreaktionen, ergibt sich eine bestimmte Belastbarkeit des Formstoffes [1].

Bindemittel werden nach ihrem Stoffbestand in kohlehydrathaltige, fetthaltige, harzhaltige, sowie natürliche Binder unterschieden. Kohlehydrathaltige Binder bestehen aus Stärke oder Zuckern; fetthaltige Binder sind verschiedene Öle; harzhaltige Binder bestehen, wie der Name schon sagt, aus Harzen. Natürliche Bindemittel sind kolloidale Stoffe, die in Sanden und Lehmen enthalten sind [17].

2.4.1 Anorganisches System

Anorganische Bindersysteme, zu denen Lehm, Zement oder Ton gehören, sind die am längsten verwendeten Binder. Sie werden seit dem Beginn der Gießerei, vor ca. 5000 Jahren verwendet. Gegenwärtig werden aber Lehm und Zement kaum verwendet, weil ihre Festigkeit in der Kernherstellung nicht den Anforderungen

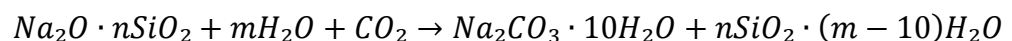
moderner Gießereien entspricht. Als Lehm bezeichnet man tonige Mineralgemenge, die höhere Anteile an Sand und Kalkstein sowie Eisenverbindungen aufweisen. Mit Wasser können die Lehme zu einer gut formbaren, bildsamen Masse vermischt werden. Die Verfestigung der Lehmformen erfolgt beim Austrocknen. Zement ist ein hydraulischer Bindungsagent, der aus Kalk und Mergel unter Wasserabspaltung hergestellt wird. Er enthält als Hauptbestandteile Kalziumoxid und Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxid und kommt hauptsächlich für große Formen und Kerne zum Einsatz.

Gips wird als Bindemittel im Genaußverfahren verwendet. Er kann auf drei verschiedene Arten in der Gussteilerzeugung eingesetzt werden [18]:

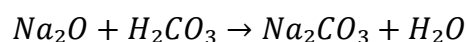
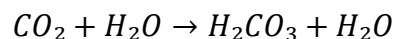
- als Bindemittel in Verbindung mit einem Formgrundstoff, z.B. Quarzsand
- als Formstoff in Verbindung mit Wasser beim Gipsformverfahren
- als Modellwerkstoff.

Kieselsaure- und Silikatbinderlösungen stellen eine weitere wichtige Gruppe der anorganischen Binder dar. Dabei handelt es sich um Lösungen des SiO_2 in Wasser und wird daher als Wasserglas bezeichnet. Zum Aushärten kommt CO_2 zum Einsatz. Dabei wird die Wasserglas-Sand-Mischung mit CO_2 ca. 15 bis 60 Sekunden begast. Als Vorteile sind zu nennen: Keine Gesundheitsgefährdung, sehr hohe Maßgenauigkeit und Energiesparsamkeit. Nachteile sind die nur befriedigende Festigkeit, der schlechte Zerfall nach dem Gießen und die begrenzte Lagerfähigkeit der Kerne [19]:

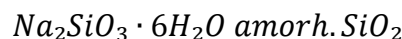
Die Aushärtungsreaktion verläuft nach der Reaktion:



über die Soda – Teilreaktionen:



zum Endreaktionsprodukt:



Beim Wasserglas-Ton-Verfahren wird ein plastischer Formstoff durch eine Kombination aus Verdichtung und chemischer Härtung verfestigt. Durch Zugabe von Bentonit oder Ton kann man das Formteil direkt nach der Verdichtung vom Modell oder Kernkasten trennen.

Das Wasserglas-Ester-Verfahren ist wohl das bedeutendste Verfahren der Gruppe der Wasserglas-Binder. Dabei wird die Verfestigung im Formstoffhaufwerk durch organische Ester (z.B. auf der Basis der Essigsäure oder Propylenkarbonat) erreicht. Dieses Verfahren ist in der Nichteisengießerei weit verbreitet. Es ist neben dem Zementformverfahren das einzige wichtige anorganische, kaltselbsthärtende Formverfahren. In Aluminiumgießereien wird es zur Form- und Kernherstellung im Bereich des Handformgusses mit Gussteilmassen von bis zu ca. 1 t angewendet. Vorteile sind hier das günstige Arbeitsplatz- und Umweltverhalten und dem im Aluminiumguss relativ unproblematischen Zerfallsverhalten [20].

In der jüngeren Vergangenheit wurden neuartige Bindersysteme entwickelt. Sie beruhen auf der bekannten Tatsache, dass mit der Verwendung von temperierten Formwerkzeugen wasserglasgebundene Formstoffe zu deutlich höheren Festigkeiten gebracht werden können. Der Hauptimpuls zu dieser Entwicklung waren immer höhere Materialanforderungen seitens der Automobilindustrie, insbesondere in der Großserienfertigung von teilweise hochkomplexen und filigranen Kernen für Fahrzeugkomponenten. Beispiele dazu sind Inotec® und Cordis®, die auf Basis modifizierter Silikat- oder Wasserglasbinderlösungen funktionieren.

Inotec® ist ein Bindemittel auf Silikatbasis, bei dem die Aushärtung, anders als bei bekannten CO₂-Verfahren, nicht rein chemisch durch eine Kombination aus physikalischem Trocknungsprozess und chemischen Reaktionen erfolgt. Dazu werden beim Inotec®-Prozess beheizte Kernkästen eingesetzt. Durch die Wärme des Kernkastens (150-200°C) wird einerseits das Wasser, das als Lösungsmittel für die Silikate dient, aus dem Kern ausgetrieben, zum anderen wird eine chemische Reaktion angeregt, die zu einer Vernetzung der Silikatmoleküle führt. Die Vorteile dieses Verfahrens sind die Reduzierung von Gerüchen und Emissionen sowie einfachere Reinigung und Wartung der Gießwerkzeuge.

Die Basis des Cordis®-Bindersystems ist Wasser als Lösungsmittel in Kombination mit einer anorganischen Bindermatrix. Diese Bindermatrix besteht je nach Anwendung aus einer unterschiedlichen Kombination modifizierter Phosphat-, Silikat- und Boratgruppen. Bei der Kernherstellung wird der Formstoff in erwärmte Kernkästen geschossen. Die Kernkastentemperatur liegt, abhängig von der

Kerngeometrie, bei 120 und 160°C. Der Vorteil im Gegensatz zu organischen Bindersystemen ist, dass die Kondensatbildung erheblich reduziert wird [11].

2.4.2 Organisches System

Die wichtigsten organischen Bindemittel sind Öle, Kohlehydratbinder und Kunstharze. Ölbinder sind Mischungen aus verschiedenen natürlichen und synthetischen Fettsäuren oder entsprechenden Erzeugnissen, wie trocknende technische Öle, z.B. Tallöl oder natürliche trocknende oder halbtrocknende Öle und Fette, z.B. Leinöl, Holzöl und verschiedene Fettsäuren. Zu Kohlehydratbindern gehören Dextrose, Melasse und Sulfitablauge. Die wichtigsten Kunstharzbinder sind Phenol-, Harnstoff-, Furan-, und Reaktionsharze. Phenolharze, teilweise in Verbindung mit Furan- und Harnstoffharzen werden als Bindemittel für Masken-, Hot-Box- und Kaltharzsand-Formverfahren eingesetzt.

Allgemeine Anforderungen an organische Binder sind günstige Verarbeitungseigenschaften, lange Verwendungsfähigkeit der Binderkomponenten und eine steuerbare Aushärtecharakteristik, die Formsandmischungen sollen in möglichst kurzer Zeit die Endfestigkeit erreichen.

Organische Binder werden nach ihren Härtemethoden unterteilt. Das entscheidende Kriterium ist dabei die Wärmeeinwirkung:

- Kalthärtend: Cold-Box, CO₂, Betaset, SO₂.
- Heißhärtend: Hot-Box, Warm-Box, Maskenformverfahren
- Sonderformen: bentonitgebundener Sand, Ölsand, Kaltharz [5].

Im Folgenden wird auf die wichtigsten kunstharzbasierten Härteverfahren näher eingegangen. Harze haben sich als besonders effektive Binder erwiesen und werden daher häufig verwendet.

2.4.2.1 Furan-Kaltharz Verfahren

Das **Furan-Kaltharz**-Verfahren ist das klassische Universalverfahren für die Fertigung unterschiedlicher Gußteile in allen Gußqualitäten. Für Stahlguss stehen speziell modifizierte Furanharze ohne Stickstoff zur Verfügung. Drastisch im

Wassergehalt reduzierte Harze erlauben die Herstellung von hochwertigem Aluminiumguss. Diese Verfahren haben die folgenden Vorteile und Nachteile [21]:

Vorteile:

- niedriger Bindemittelzusatz
- hohe Reaktivität
- geringere Temperaturabhängigkeit
- gute Lagerbeständigkeit
- gute Durchhärtung
- niedrige Binderviskosität
- geringere Geruchsbelästigung
- gute Regenerierbarkeit
- universelle Einsetzbarkeit

Nachteile:

- hoher Binderpreis

Gefahr von Gasblasen wegen Stickstoffgehalt der Harze.

2.4.2.2 Phenolharz Verfahren

Harze auf Phenolbasis lassen sich durch die Zugabe ph-senkender säurehaltiger Aktivatoren aushärten. **Phenolharz** und Härter (Polyisocyanat), werden direkt in den Sand gemischt und durch Begasung mit Aminen (Trimethylamin) wird der Härter aktiviert und führt zu Aushärtung des Kerns. Die Aushärtezeit liegt bei 2 bis 30 Sekunden. Phenolharzverfahren haben die folgende Vorteile und Nachteile:

Vorteile:

- Niedriger Binderpreis
- Stickstofffreie Binder
- Lange Verarbeitungszeit
- Gleichmäßige Härtung
- Geringere Gasentwicklung beim Abgießen

Nachteile:

- Höhere Binderviskosität
- Geringere Reaktivität
- Geringere Lagerbeständigkeit des Harzes (Viskositätsanstieg)
- Phenolgehalt in Altsand
- Formstoff ist spröder

2.4.2.3 Cold-Box Verfahren

Cold-Box-Verfahren zählen zu den am häufigsten verwendeten Härteverfahren. Vor allem bei der Herstellung von Großserienkernen sind sie sehr verbreitet. Prinzipiell lassen sich zwei Grundverfahren unterscheiden. Erstens Selbsthärte-(Reaktions-) Cold-box-Verfahren. Dieses Verfahrensprinzip ist die konsequente Fortführung der No-bake-Technologie mit organischen Bindern. Die Härtingszeiten betragen 20 bis 60 s. Zweitens das Gashärte-(Begasungs-) Cold-box-Verfahren. Dieses beruht auf der Verfestigung des Formstoffes im kalten Formwerkzeug mit Hilfe eines gasförmigen Härter, der durch das Formteil geblasen wird. Die Reaktionsgase sind auf den Binder und ev. Härter abgestimmt. Gashärteverfahren (Cold-Box) im Vergleich zu heißhärtenden Verfahren haben die folgenden Vorteile und Nachteile:

Vorteile:

- Steigerung der Flexibilität
- Erhöhung der Produktivität
- Hohe Formteilqualität (Gußteilqualität)
- Einsatzmöglichkeit einer universellen Maschinenteknik
- Einsatzmöglichkeit der modernen Vacu- Technik zum Verdichten und Begasen des Formstoffes
- Energiesparsam
- Mechanisch und thermisch regenerierbar

Nachteile:

- Arbeits- und Umweltschutz

2.4.2.4 Warm-Box- und Hot-Box-Verfahren

Beim Warm- und Hot-Box-Verfahren wird die Härtung der Sandmischung durch Wärmezufuhr erreicht, das bringt höhere Festigkeit als bei kalthärtenden Verfahren.

Das **Hot-Box-Verfahren** (Abb. 2-2) kommt vor allem bei der Produktion von serienmäßigen Kernen in großen Stückzahlen, für den Grau-, Leichtmetall- und Schwermetallguß zum Einsatz. Im Leichtmetallguss wird zumeist Furfurylalkohol-Harnstoff-Formaldehydharze mit hohem Stickstoffanteil (>10%) verwendet. Das sind sogenannte Zerfallsharze mit gutem Kernzerfall und kurzen Härtezeiten. Für Schwermetalle eignen sich Furanharze mit hohem Furfurylalkohol-Gehalt (20-45%) am besten. Im Grau- und Sphäroguss sind es Phenol-Harnstoff-Formaldehydharze mit hohem Phenol-, aber geringerem Stickstoffgehalt (2-6%), die sich durch schnelle Härtung, hohe thermische Stabilität und einen guten Kernzerfall auszeichnen. Im Stahlguss werden entweder reine Phenol-Formaldehydharze oder Phenol-Furfurylalkohol-Harzmodifikationen verwendet. Aufgrund der hohen Reaktivität der speziellen Hot-Box-Bindersysteme ist dabei eine rationelle Kernherstellung infolge der erreichbaren kurzen Taktzeiten möglich.

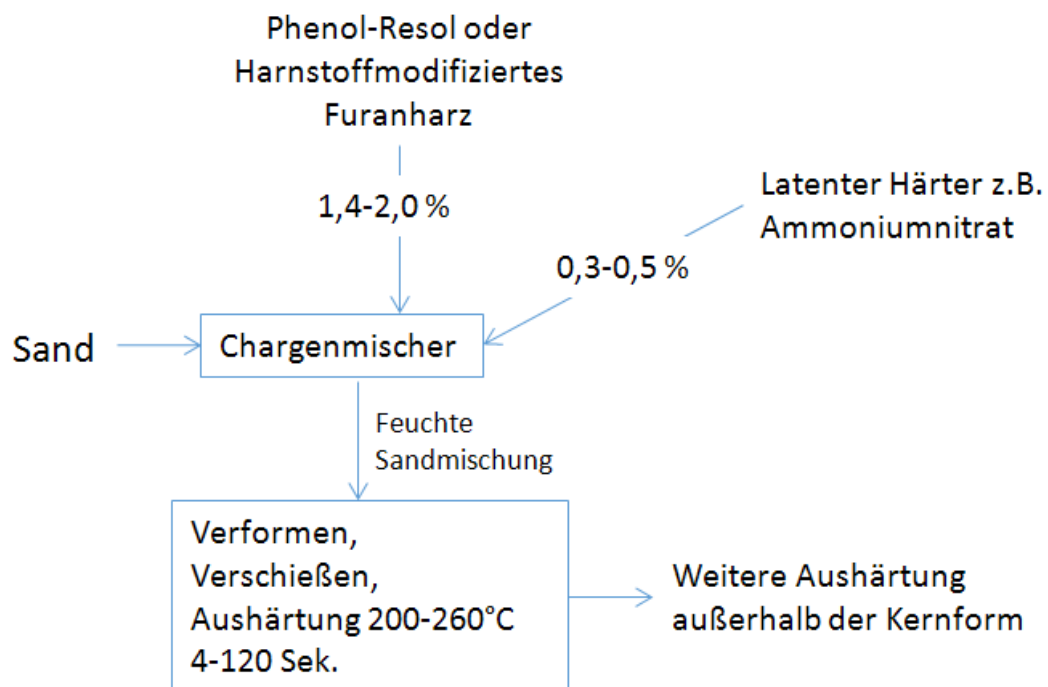


Abbildung 2-2: Hot-Box-Verfahrensschema.

Ähnlich dem Hot-Box-Verfahren ist das **Warm-Box-Verfahren**, bei dem die Härtungstemperatur wesentlich niedriger, nämlich zwischen 140-180°C liegt. Die Härtezeiten sind aber ähnlich jenen des Hot-Box-Verfahrens.

Bei den Harzen handelt es sich ebenfalls um harnstoffmodifizierte Harze, die auch einen Phenolanteil enthalten können. Diese Harze haben einen sehr geringen freien Formaldehydgehalt und sind sehr gut lagerfähig.

Verwendung finden diese Harze sowohl in Graugießereien als auch in Aluminiumgießereien [21].

2.5 Auswirkung der Abkühlbedingungen auf das Gefüge

Ziel der Gefügeauswertung ist es, den Einfluss eines Kerns aus Metallgranulat auf das Mikrogefüge des Gusststücks zu ermitteln. Dazu haben wir die Gießversuche unternommen und die Ergebnisse mit Gußstücken verglichen, die gegen Quarzsand-Kerne gegossen wurden. Im Folgenden werden einige theoretische Grundlagen zum Gießen von Aluminiumlegierungen und Gußeisen erläutert.

2.5.1 Konstitutionelle Unterkühlung:

In einem reinen Metall hängt die Stabilität der Solidus/Liquidus Grenzfläche von der Richtung des Wärmeflusses, bzw. vom Temperaturgradienten ab. Wenn die Schmelze in eine kalte Form gegossen wird, startet die Erstarrung an der Form. Die Richtung des Wärmestroms zeigt von der heißen Schmelze zu kalten Form. In entgegengesetzter Richtung dazu wachsen die Kristalle an einer planaren Erstarrungsfront. Weil die Schmelze der heißeste Teil ist, steigt die Liquidustemperatur immer direkt vor der Erstarrungsfront, was einen positiven Temperaturgradienten bedingt. Tritt Perturbation auf, steigt der Temperaturgradient in der Flüssigphase, während der Gradient in der Festphase sinkt. Daher fließt mehr Hitze in die Spitze der Perturbation und lässt diese langsamer wachsen. Dies bewirkt eine planare Erstarrungsfront. Bei der äquiauxialen Erstarrung zeigt sich genau das Gegenteil. Das zufällige Wachstum eines freien Kristalls in eine unterkühlte Schmelze führt zu einem Wärmefluss vom Kristall zur unterkühlten

Schmelze. Die Steigung des negativen Temperaturgradienten nimmt zu und mehr lokale Wärme wird abgeführt, was zu einer instabileren Erstarrungsfront führt [22, 24].

Betrachtet man eine Legierung, muss nicht nur der Effekt des Wärmeflusses berücksichtigt werden, sondern auch der Einfluss der Legierungselemente. Während der Erstarrung einer Legierung, führt die geringere Löslichkeit der Legierungselemente in der festen Phasen zu einer Anhäufung vor der Solidus/Liquidus-Erstarrungsfront. Da die Zusammensetzung der Festphase jener der Legierung in großem Abstand zur Grenzfläche entspricht, kann der exponentielle Abfall der Konzentration der gelösten Phase in der Grenzfläche wie folgt beschrieben werden [23]:

$$c_l(z) = c_0 + \Delta c_0 \left(-\frac{v}{D} \cdot z\right) \quad (1)$$

c_l = Konzentration der Flüssigphase in der Grenzfläche

c_0 = Konzentration der Solidphase weit entfernt zur Erstarrungsfront

Δc_0 = Konzentrationsabweichung

v = Wachstumsrate

D = Diffusionskoeffizient der Schmelze

z = Entfernung zu Erstarrungsfront

Die Änderung der Lösungskonzentration beeinflusst die lokale Equilibriumstemperatur T_L . Die Abweichung der lokalen Equilibriumstemperatur und der Liquidustemperatur ΔT kann nach folgender Gleichung beschrieben werden.

$$\Delta T = T_l(c_0) - T_l = m(c_0 - c_l) \quad (2)$$

Wobei m die Steigung der Liquiduslinie ist.

Abb. 2-3 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Phasendiagramm, der Diffusionsgrenzschicht und der Temperatur. Während c_l mit der Distanz zur Schnittstelle abnimmt, nimmt T_l zu. Wenn der Gradient der T_q kleiner ist als der Gradient der T_l ist die Flüssigkeit konstitutionell unterkühlt. Ob eine konstitutionell

unterkühlte Zone vor der Erstarrungsfront einer Legierung entsteht, hängt vom Temperatur Gradienten G ab (vgl. Gleichung (3)).

Die Faktoren für der Gradienten G sind in Gleichungen 3 und 4 dargestellt:

$$G = \left(\frac{dT_q}{dz}\right)_{z=0} \quad (3)$$

$$T_l(z) > T_q \quad (4)$$

Der Schnittbereich (Abb. 2-3) ist konstitutionell Unterkühlt wenn Gleichung 4 gilt.

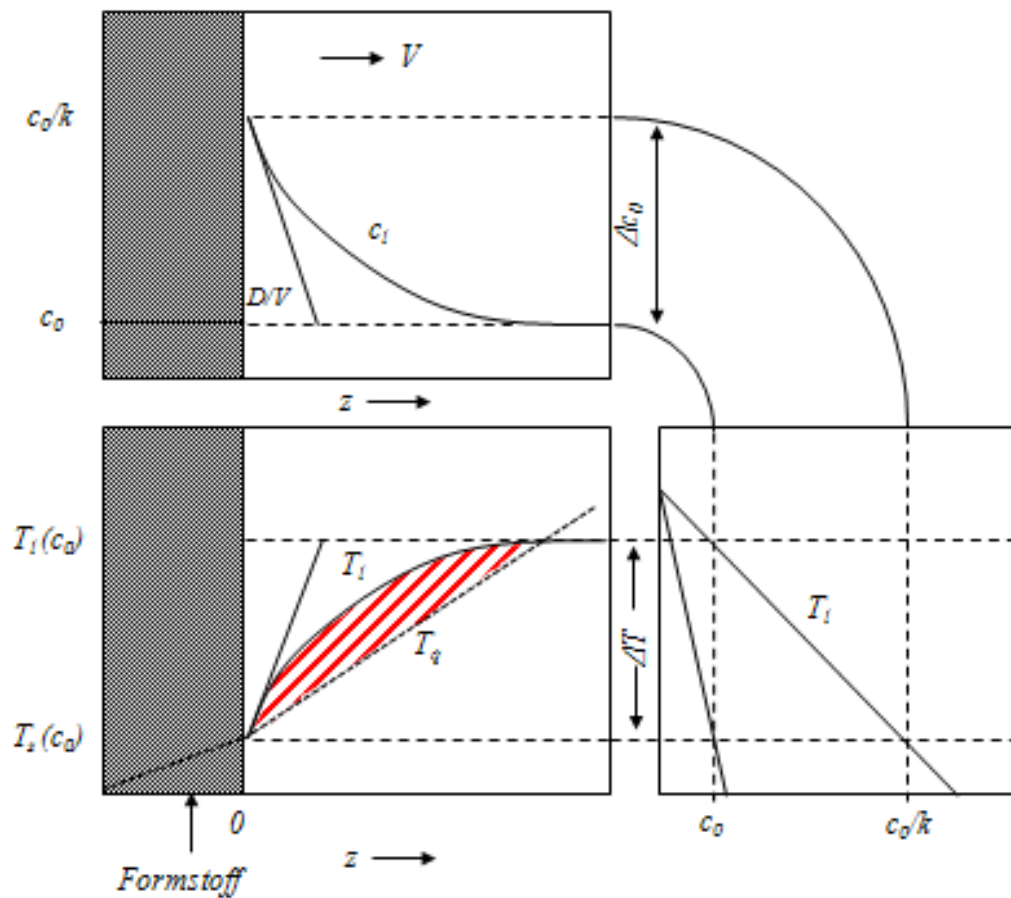


Abbildung 2-3: Konstitutionelle Unterkühlung einer Legierung [23].

Die Abb. 2-4 fasst die typischen Mikrostrukturen in Abhängigkeit des Gradienten G sowie der Erstarrungsfrontgeschwindigkeit V zusammen [24].

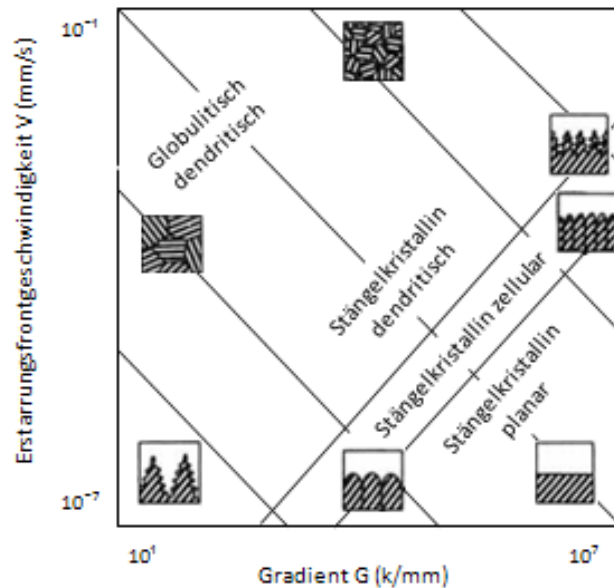


Abbildung 2-4: Abhängigkeit der Erstarrungsfrontgeschwindigkeit V und der Temperaturgradienten G [25].

2.5.2 Dendritenarmabstand:

Im Gegensatz zu den Abständen der Primärdendriten ist der Armabstand der Sekundärdendriten stark von der Oberflächenreifung schon während ihres Wachstums abhängig. Während des Reifungsprozesses verschwinden Dendritenarme höherer Ordnung und verstärken das Wachstum der größeren Dendritenarme (Abb. 2-5).

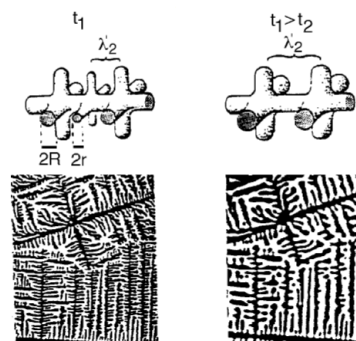


Abbildung 2-5: Die Änderung der Dicke der Dendritenarme durch Ostwald Reifung nach 20 Minuten [24].

Abbildung 2-6 zeigt den Zusammenhang des Dendritenarmabstandes mit der lokale Erstarrungszeit mit dem Faktor $\sqrt[3]{t_f}$. Diese ist definiert als die Zeit die jeder Arm Kontakt mit der flüssigen Phase hat. Sie ist daher eine Funktion der Wachstumsrate des Temperaturgradientes und der Legierungszusammensetzung. Der Dendritenarmabstand hat große Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften da er mit λ_1 die Abstände von Seigerungen und Porosität (in binären niedriglegierten Legierungen) bestimmt [24]. Wobei bei komplexen Legierungen auch eutektische Reaktionen beim letzten Erstarrungsintervall zu berücksichtigen sind. Bei entgasten Al-Schmelzen kommt es zu einer Anreicherung von H und zur Porenbildung, jedoch erst auf Korngrenzen.

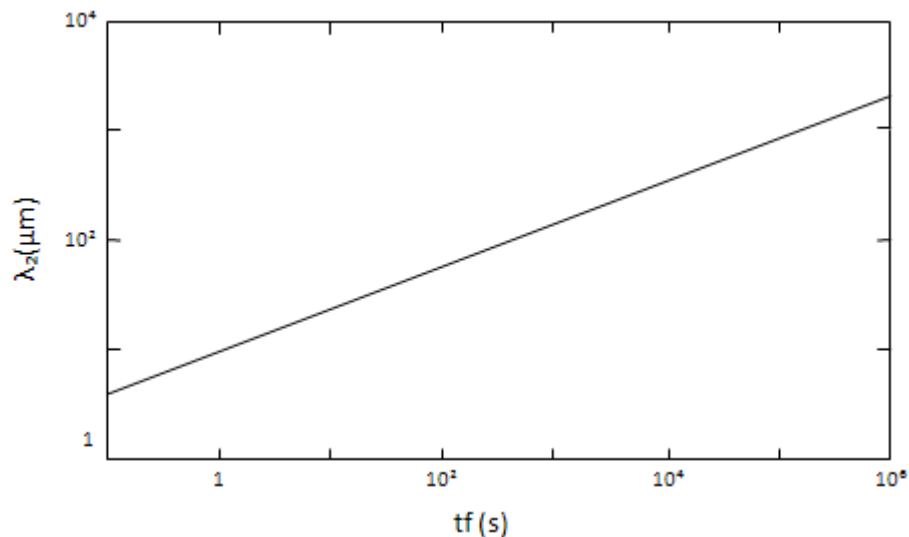


Abbildung 2-6: Abhängigkeit Dendritenarmabstand und Abkühlzeit [26].

Um den primären Dendritenarmabstand λ_1 (Abb.2-7) mathematisch zu beschreiben, sind verschiedene Theorien entwickelt worden, die sich allein durch den Proportionalitätsfaktor ε unterscheiden, während die Exponenten von V und G identisch sind. Insbesondere haben V und G üblicherweise einen unterschiedlichen funktionalen Zusammenhang zu λ_1 .

Nach Ratke [36] folgt der Primäre Dendritenarmabstand folgendem Zusammenhang:

$$\lambda_1 = \varepsilon \cdot V^{-1/4} \cdot G^{-1/2} \quad (5)$$

Wobei,

λ_1 – der primäre Dendritenarmabstand

ε – ein Proportionalitätsfaktor

V – die Erstarrungsgeschwindigkeit und der

G – der Gradient ist.

Aus Gl. (5) ist ersichtlich, dass die primären Dendritenarmabstände mit größer werdenden Gradienten und höherer Erstarrungsgeschwindigkeit kleiner werden. Dies hat einen positiven Effekt auf die mechanischen Eigenschaften. Hat sich einmal der primäre Stamm eines Dendriten gebildet, so verändert sich seine Form während des weiteren Erstarrungsverlaufs nicht mehr.

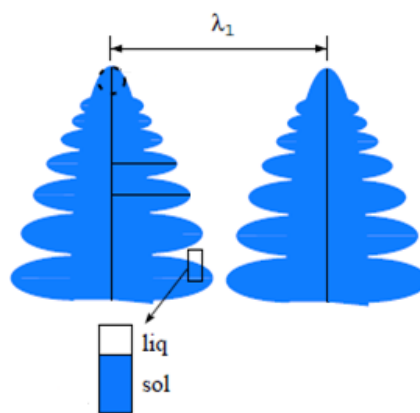


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung zum primären Dendritenarmabstand λ_1 .

2.6 Abkühlbedingungen von Aluminiumlegierungen

Aluminiumlegierungen am Gießereisektor sind größtenteils siliziumlegiert. Daneben existiert noch eine Reihe von weiteren Legierungen, welche aber nur in geringerer Menge vergossen werden, z.B. Al-Cu oder Al-Zn Legierungen. Diese Arbeit beschränkt sich auf Untersuchungen an einer Legierung - Al Si7Mg, die am Markt breite Verwendung im Sandguss findet.

Abhängig vom Gehalt des Legierungselementes sowie der Abkühlgeschwindigkeit liegen unterschiedliche Formen von Erstarrungstypen vor. Dadurch kann aber auch auf die Eigenschaften des Gussteils Einfluss genommen werden. Die Abkühlrate hat wesentlichen Einfluss auf die Korngröße, während die vorhandenen Legierungselemente die Art der Erstarrung beeinflussen. Al Si7Mg bildet ein dendritisches Gefüge mit Resteutektikum von Al-Si.

Die Erstarrungsmorphologie kann durch entsprechende Maßnahmen (z.B. durch den Einsatz von Kühlkokillen) gezielt beeinflusst werden. Dies ist auf den Effekt der konstitutionellen Unterkühlung zurückzuführen, welche aus Mikroseigerungen von Legierungselementen vor der Erstarrungsfront resultieren. Mit zunehmender Abkühlgeschwindigkeit wird die konstitutionelle Unterkühlung vermindert [33].

2.7 Abkühlbedingungen von Gusseisen

Die gekoppelte eutektische Erstarrung von Gusseisen mit Lamellengraphit (GJL) ermöglicht eine speiserlose Giessweise durch die gleichzeitige Ausdehnung des Graphits und die Erstarrungsschrumpfung des Austenits. Im Gegensatz zum Speisungsverhalten beim GJL ist für Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS) eine gelenkte Erstarrung zum Speiser notwendig. Die Kugelform kann, nach einer Entschwefelung (Mg-Sulfide), durch eine Behandlung der Schmelze mit Magnesium, Calcium oder Cer erreicht werden. Um das Problem des hohen Dampfdruckes von Magnesium zu umgehen, wird es am besten als Mg-Vorlegierung (NiMg oder FeSiMg) oder durch spezielle Methoden wie dem Georg Fischer Konverter oder der Drahteinspülungen in die Schmelze eingebracht. Wird danach noch eine Impfbehandlung mit 0,4 bis 0,7 % FeSi und anderen sauerstoffaffinen Elementen (Al, Zr) durchgeführt, erhöht sich die Zahl der Sphäroliten und eine ideale Graphitform wird begünstigt. Auch der Weißeinstrahlung bei geringerer Wandstärke wird so begegnet. Die innere Kerbwirkung der Graphitkugeln im Sphäroguss ist wesentlich kleiner als die der Lamellen im Gusseisen mit Lamellengraphits, was deutliche Vorteile bei den mechanischen Eigenschaften bringt.

Eine langsame Abkühlung erhöht den Ferritanteil, der häufig als Saum um die Graphitspäroliten angeordnet ist. Der Ferritsaum entsteht durch eine Kohlenstoffdiffusion zum Graphit, der die umgebende Matrix kohlenstoffarm macht und damit den Ferrit stabilisiert. Zusätzlich werden graphitstabilisierende Elemente wie Si aus der Graphitkugel ausgeschieden und reichern die umsäumende Matrix an. Bei langsamer Abkühlung verbleibt mehr Zeit für Diffusion, so dass der Ferritsaum größer wird. Die wird durch die lokalen Erstarrungszeiten bzw. Abkühlbedingungen beeinflusst (z.B. metallische Kerne).

3 Versuchsdurchführung

Es wurden Kerne aus 13 verschiedenen Kernsandmischungen hergestellt um diese, anhand der Biegefestigkeit, auf mechanische Belastbarkeit zu testen. Metallgranulat als Formgrundstoff wurde genauer untersucht. Zu diesem Zwecke wurden Giessversuche mit den Aluminiumlegierung Al Si7Mg, sowie mit Gusseisen GJS-450 unternommen. Die Gussteile wurden mit anderen Gussteilen, die gegen Quarzsand-Kerne gegossen wurden, hinsichtlich ihrer Mikrostruktur verglichen. Um die unterschiedlichen Eigenschaften der Kerne und ihre Einflüsse auf das Gießverhalten verstehen zu können, wurde auch Kornform, Kornoberfläche, Korngrößenverteilung und Mikrostruktur (Dendritenarmabstand und Schreckwirkung) untersucht. Eine Übersicht über die verwendeten Mischungen, Versuche und Analysen zeigt Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Übersicht über die verwendeten Mischungen, Versuche und Analysen.

	Formstoff				Gußstück		
	Kerne		Formgrundstoff		Al Si7Mg	Gusseisen GJS-450	
	Biegefestigkeitsprüfung		Kornformoberfläche (REM)	Korngrößenverteilung	Dendritenarmabstand	Gefügeuntersuchung	Härte
	Cold-Box	Warm-Box					
Quarzsand	+	+	+	+	+	+	
Chromitsand	+		+	+			
Zitrkonsand	+		+	+			
Bauxitsand	+		+	+			
Metallgranulat	+	+	+	+	+	+	
Metallgranulat + 20 Gew.% Quarzsand	+		+				
Metallgranulat + 20 Gew.% f. Quarzsand	+						
Metallgranulat + 10 Gew.% Zirkonsand	+		+				
Metallgranulat-Regenerat	+						
Metallgranulat-Regenerat + 20 Gew.% Zirkonsand	+						

3.1 Untersuchung der mechanische Belastbarkeit

3.1.1 Korngrößenverteilung

Mithilfe der Siebanalyse (Retsch) wurde nach DIN 4188 eine statistische Verteilung der Mengenanteile der einzelnen Korngrößen für Quarz-, Chromit-, Zirkon-, Bauxitsand und Edelstahlmetallgranulat (Nr. 1.4301 (X5CrNi18-10), arrondiert und rostfrei) erstellt. Dabei werden Mischungen durch hintereinander geschaltete Siebböden in verschiedene Kornklassen zerlegt. Durch wiegen der einzelnen Kornklassen wurden für die Sandmischungen Kornverteilungskurven erstellt.

3.1.2 Herstellung der Probenkörper

Vor den Testdurchgängen musste der Formstoff für die Prüfungen hergestellt werden. Für die Biegefestigkeitsprüfung (Abb. 3-6) wurde eine Mischung mit 2 kg (Tab. 3-2, 3-3) angefertigt, aus der die Probenkörper hergestellt wurden. Die jeweiligen Komponenten wurden einzeln eingewogen und anschließend im Rührmischer (Mixmüller) (Abb. 3-1) 3 Minuten hinreichend durchmischt.



Abbildung 3-1: Rührmischer.



Abbildung 3-2: Kernsandschießmaschine.

Die Formgebung der Probenkörper erfolgte direkt nach dem Mischen in einer 5 L Kernschießmaschine (Röperwerk) (Abb. 3-2). Alle Mischungen mit Metallgranulat (MG) wurden per Hand in die Formen eingefüllt und gestampft, da die Metallpartikel die Kernsandschießmaschine verstopfen und die Biegeriegel, die zu Anfang mit der Kernschießmaschine hergestellt wurden, sehr schlechte Festigkeitswerte aufwiesen. Zum Aushärten kamen zwei Methoden zur Anwendung, Cold-Box und Warm-Box die in folgenden Tabellen 3-2 und 3-3 beschrieben werden.

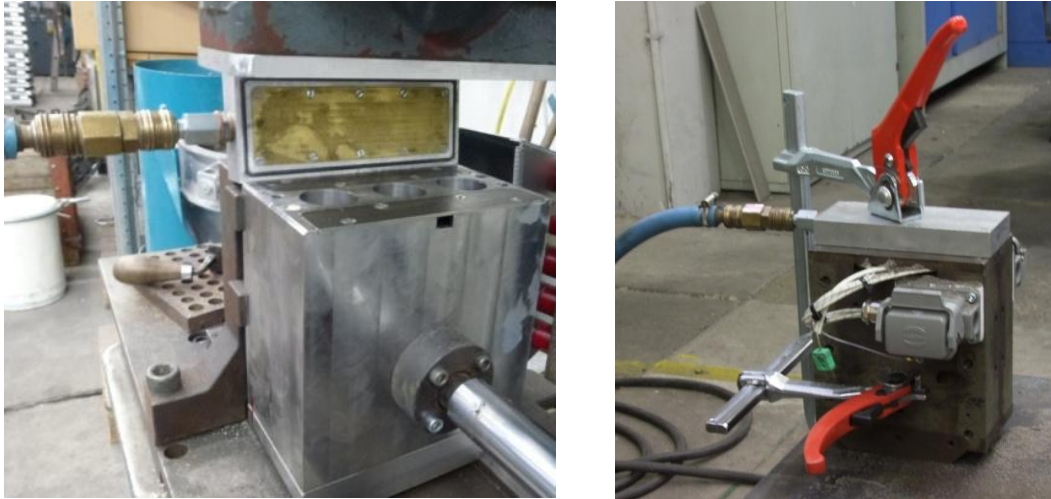


Abbildung 3-3: links: Anlage zur Begasung mit Dimetylisopropylamin; rechts: Form mit Heizelement.

Bei der Cold-Box-Methode wurde das Harz „Askocure 355 Hydro“ verwendet. Als Binder wurde eine Phenolharzlösung mit der Zusammensetzung: Phenol, Formaldehyd, Naphtha 3,5,5-Trimethyl-2-cyclohexen-1-on, Methanol benutzt. Als Härter wurde „Askocure 655 Hydro“ benutzt. Das ist eine Isocyanatzubereitung mit Zusammensetzung: Diphenylmethan-4,4-diisocyanat.

Die Proben wurden im Kernkasten bei Raumtemperatur 15 Sekunden mit Dimetylisopropylamin in einem Begasungsgerät (Lüber/Bazenheid) begast (Abb. 3-3). Anschließend wurden die Proben mit Luft gespült. In Tabelle 3-2 sind die verwendeten Mischungen und ihre Bestandteile zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Zusammensetzungen von Mischungen für Cold-Box-Verfahren.

Grundstoff	Bezeichnung	Zusatz	Harz AskoCure 355	Härter AskoCure 655
Quarzsand	Qz	-	0,6 Gew%	0,6 Gew%
Chromitsand	Chr	-		
Zirkonsand	Zr	-		
Bauxitsand	Bx	-		
Metallgranulat	MG	-		
Metallgranulat	MG+20% Qz	20 Gew% Quarzsand		
Metallgranulat	MG+20% f.Qz	20 Gew% Quarzsand Feinanteil <0,25 mm		
Metallgranulat	MG+10% Zr	10 Gew% Zirkonsand		
Metallgranulat- Regenerat	MG-Reg	-		
Metallgranulat- Regenerat	MG- Reg+20% Zr	20 Gew% Zirkonsand		

Bei der Warm-Box-Methode wurden Proben aus drei verschiedenen Mischungen (je 10 kg) mit zwei Bindesystemen getestet (siehe Tab.3-3):

1. Modifiziertes Furanharz „Furesan 7022“ mit Härter „Furedur 8154“, wässrige Lösung von Phenolsulfonsäure, drei Aluminiumsalze, Schwefelsäure und organischen Bestandteilen.
2. Modifiziertes Harnstoff-Furan-Phenolharz „Furesan 8885“. Härter „Furedur 8099“, wässrige Lösung von Phenolsulfonsäure und drei Aluminiumsalze.

Die Proben verblieben zum Aushärten für 20-50 Sekunden in der Form und wurden durch ein Heizelement auf 200-220°C erwärmt (Abb. 3-3).

Tabelle 3-3: Zusammensetzungen von Mischungen für Warm-Box-Verfahren.

Grundstoff	Bezeichnung	Harz	Härter
Quarzsand	Qz	№7022 – 1,39 Gew%	№8154 – 0,25 Gew%
Quarzsand	Qz	№8885 – 1,41 Gew%	№8099 – 0,35 Gew%
Metallgranulat	MG		

3.1.3 Prüfung der Kernsandproben

Die Probenkörper wurden jeweils auf Biegefestigkeit geprüft. Dies geschah jeweils sofort nach der Herstellung, nach 1 Stunde, nach 4 Stunden und nach 24 Stunden (Abb. 3-4 bis 3-6). Die Prüfungen erfolgten mit einer computergesteuerten Tischprüfmaschine. Es handelt sich um eine elektrisch gesteuerte Prüfmaschine mit einer maximalen Prüfkraft von 5 kN (Z005 Proline, Zwick/Roell). Die Auswertung erfolgte mittels der zugehörigen Software (testXpertII).

**Abbildung 3-4:** Elektrisch gesteuerte Prüfmaschine mit Biegeprüfvorrichtung.**Abbildung 3-5:** Probenkörper.



Abbildung 3-6: Biegefestigkeitsprüfungen.

Die Prüfung auf Biegefestigkeit erfolgte mittels Drei-Punkt-Biegeprüfung. Dabei wird eine Biegeprobe ($22,4 \times 22,4 \times 150$ mm) horizontal in die Prüfvorrichtung eingebracht (Abb.3-6). Nach dem Start fahren die Stempel der Prüfmaschine solange zusammen, bis der Bruch der Probe eintrat. Die Aufzeichnung des Kraft – Weg Verlaufes erfolgte computergesteuert und konnte während des Versuch beobachtet werden. Nach Erreichen der Maximalkraft (Bruch) (Abb. 3-8) erfolgte ein signifikanter Kraftabfall. Die Prüfung wurde daraufhin beendet. Manche Biegeproben aus Metallgranulat wurden mit einem Kerneisen (KE) vorbereitet, um eine eventuelle Erhöhung der Biegefestigkeit zu erreichen (Abb. 3-7).



Abbildung 3-7: Kernform mit Heizelement. Biegeproben aus Metallgranulat mit Kerneisen (Draht).



Abbildung 3-8: Gebrochene Biegeproben aus Metallgranulat.

3.2 Gießversuche

Der Einfluss verschiedener Kernmischungen auf die Mikrostruktur der Gussteile wurde an Hand von Gießversuchen untersucht. Jede Mischung wurde an einer kommerziell verfügbaren Al-Legierung (Al Si7Mg) und an Gusseisen mit Kugelgraphit GJS-450 getestet. Der Gießversuch wurde mit den gebrochenen Biegeriegeln als Einlegekern ausgeführt.

Als Maß für Erstarrungszeit und die Feinheit des Gefüges wurde bei Gussstücken aus Al Si7Mg Legierung der Dendritenarmabstand (DAS) gemessen.

Die Gusseisenlegierung GJS-450 (nach DIN EN 1563), wurde mit FeSi geimpft und einer Mg-Behandlung mit NiMg unterzogen.

Zum Herstellen der Formen sind, wie üblich, Formkasten, Modell, Speiser und Eingußsystem verwendet worden. Als Modelle kamen einteilige, aus Kunststoff gefertigte Bügelmodelle in zwei Größen (25 und 30 mm Bügelbreite) zum Einsatz (siehe Abb. 3-9). Dieses Bügelmodell war so gewählt, dass die halbierten Biegeproben als Kernersatz dazu passen. Dies sollte den Einfluss auf das Gefüge deutlich definieren und die Schreckwirkung von klassischen Kernen und alternativen Formstoffen erkennbar machen.

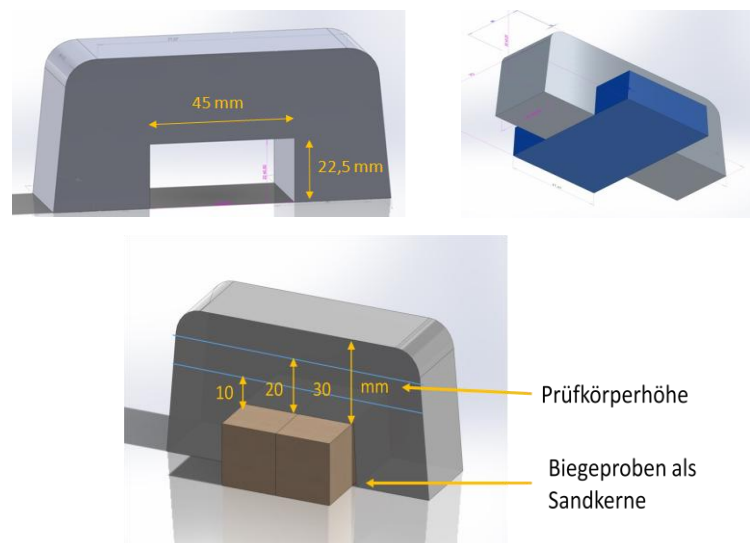


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung einer Bügelproben.

Der Formkasten ist zweiteilig. Nach dem Einfüllen der Sandmischung, wurde diese verdichtet. Der Sand bleibt nach der Verdichtung an der Innenwand des Formkastens haften und bildet die Modellkontur als Negativ ab. Die Sandmischung wurde mit Hand mit Hilfe eines pneumatischen Verdichters zu einer Form verarbeitet. Als erstes wurde der untere Teil befüllt. Danach wurde der obere Teil vorbereitet Eingußsystem und Speiser eingerichtet und Gaskanäle eingbohrt. Danach wurden die Modelle entnommen und die Kerne eingebracht (siehe Abb. 3-10). Um ein sauberes Trennen der Kastenteile nach dem Gießen zu ermöglichen, wurde auf die Modelloberfläche und die frei liegende Sandfläche ein Trennmittel (Talkum-Pulver) aufgebracht. Schlussendlich wurde ein Eingußstrichter in den Sand in den Oberkasten einbohrt, danach wurde die Al-Schmelze mit einer Gießtemperatur von 725°C (Gußeisen 1350°C) gegossen.

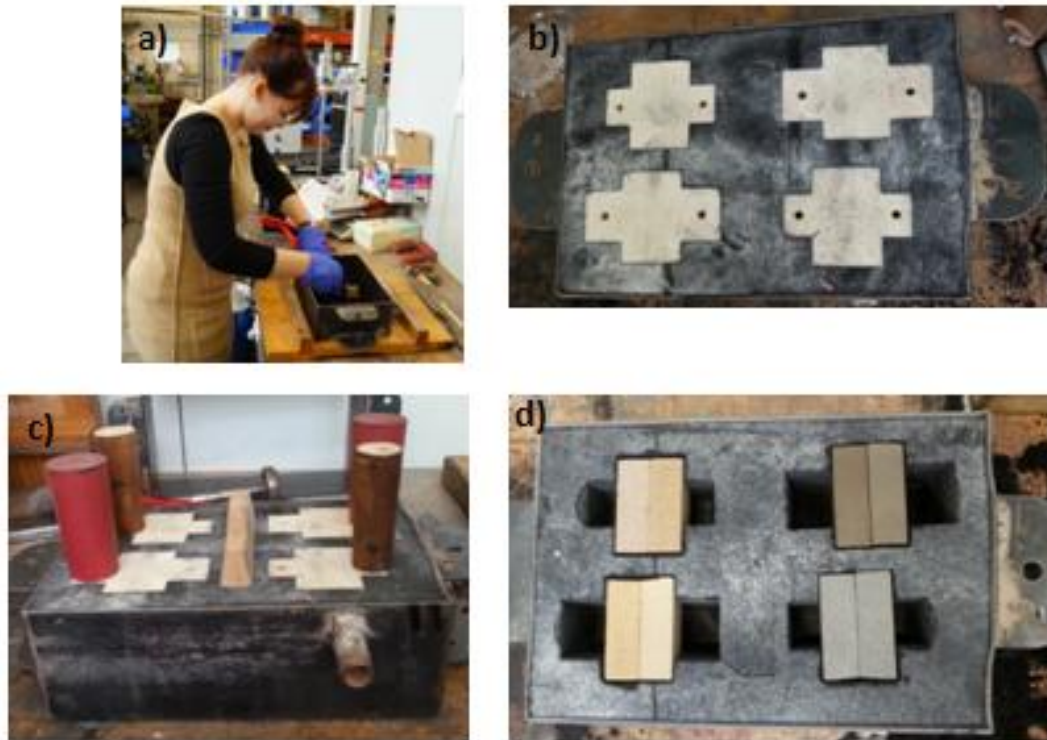


Abbildung 3-10: a) Herstellung einer Gießform; b) untere gefüllte Kasten mit Modellen; c) Kasten mit Modellen und Speisen; d) untere Formkasten mit Sand-Kerne – links und Metallgranulat – rechts.

Nach dem vollständigen Erstarren der Gussteile, wurde, wie in Abb. 3-11 bis 3-14 ersichtlich, ein Teil aus dem Bügel herausgeschnitten, danach wurde einer der Schnittseite geschliffen, poliert und geätzt. (Schleifen: Körnung 320 zu 3 min, Körnung 800 zu 3 min und Körnung 1200 zu 2 min, Polieren Diamantsuspension 3 μm zu 3 min und OPS Suspension zu 1 min). An diesem Anschliff wurde unter dem Lichtmikroskop (Olympus, BX51) die Mikrostrukturuntersuchung vorgenommen (Abb. 3-16).



Abbildung 3-11: geöffnete Form nach dem Gießversuch.



Abbildung 3-12: Fertige Gussteile.

Vom herausgeschnittenen Teil wurde auf der Schnittseite ein Anschliff angefertigt. Von der polierten Fläche wurde jeweils eine Gefügaufnahme vom Bereich A (Rand) und Bereich C (Mitte) gemacht (Abb. 3-13), um danach metallographische Untersuchungen durchzuführen. Im Zuge dessen sind die Verfahren Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie angewandt worden.

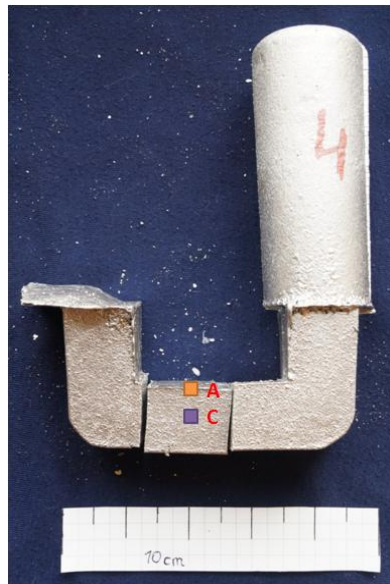


Abbildung 3-13: Geschnittene Gussteil.



Abbildung 3-14: Geschnittene Gussteile, links- Aluminium; rechts – Gusseisen.

3.2.1 Lichtmikroskopie

Lichtmikroskopie ist eine Methode zur Gefügeuntersuchung mit einer Auflösung, die sich aus dem Quotienten von λ/d (Wellenlänge des Lichts/Abstand der Objektivapparatur) ergibt und typischerweise in einer Größenordnung von $1 \mu\text{m}$ liegt. Voraussetzung für eine Untersuchung ist eine Probe mit einer optisch ebenen und polierten Oberfläche [19].

Als Lichtmikroskop wurde das Modell Olympus BX51 mit der Bildanalyse-Software Stream Enterprise verwendet.

3.2.2 Gefügeauswertungen

An Hand der Gefügaufnahmen wurden der Dendritenarmabstand bei der Legierung Al Si7Mg untersucht. Bei Gusseisenproben wurde einerseits das Gefüge untersucht und die Härte von Probenrand und -mitte gemessen (siehe Abb. 3-15). So konnten Erkenntnisse über die Veränderungen der Mikrostrukturen auf Grund der unterschiedlichen Kernmaterialien gewonnen werden.

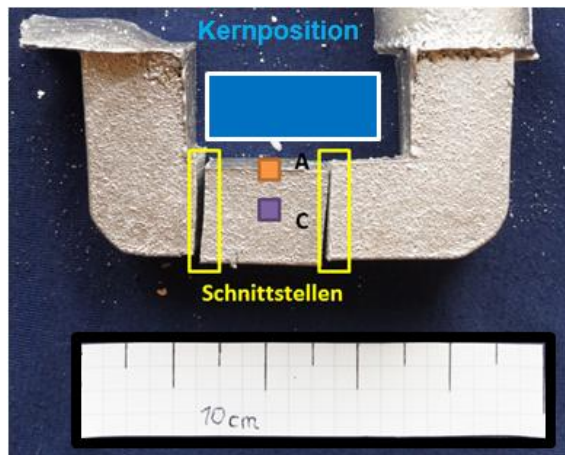


Abbildung 3-15: Geschnittene Probe mit Untersuchungsbereichen (gilt für Innenseite der Probe).

Der Dendritenarmabstand (DAS) ist der Abstand zwischen den Dendritenarmen der Dendriten. Für jeden Untersuchungsbereich (siehe Abb. 3-16) wurden jeweils mindestens 50 Messungen durchgeführt und ein Mittelwert berechnet.

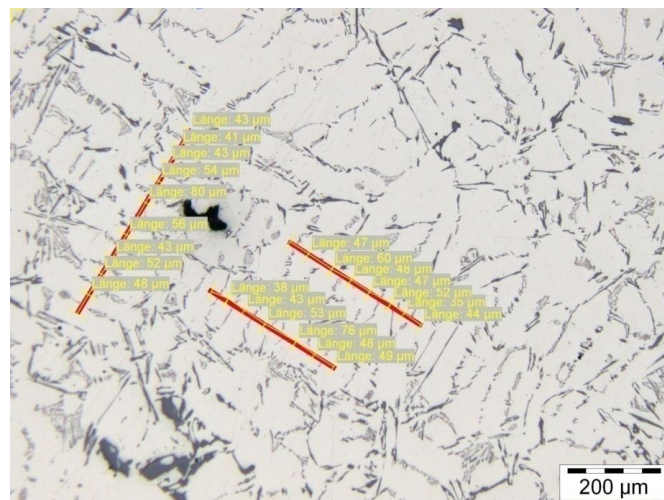


Abbildung 3-16: Gefügaufnahme mit Dendritenarmabstand-Messungen.

3.2.3 Rasterelektronenmikroskopie

Am Materials Center Leoben (MCL) wurden Aufnahmen der Sandkörner mit dem Rasterelektronenmikroskop Zeiss, EVO MA 25 angefertigt.

Das REM zeichnet ein Auflösungsvermögen, welches das Lichtmikroskop um zwei bis drei Zehnerpotenzen übertrifft und eine sehr hohen Tiefenschärfe aus. Außerdem kann man die betrachteten Proben unmittelbar einer Röntgenanalyse zu Bestimmung der Zusammensetzung unterziehen. Das Rasterelektronenmikroskop rastert die Probenoberfläche mittels eines feingebündelten Elektronenstrahls ab. Der Elektronenstrahl wird an einer Kathode erzeugt. Diese emittiert Elektronen, die zu einem Crossover ($<50\mu\text{m}$) gebündelt und zur Anode beschleunigt werden, wobei die Beschleunigungsspannung zwischen 100 und 30.000 Volt liegen kann. Die Elektronen werden durch Wärmezufuhr (Heizstrom), oder durch hohe elektrische Felder (kalte Feldemission) aus der Kathode ausgelöst.

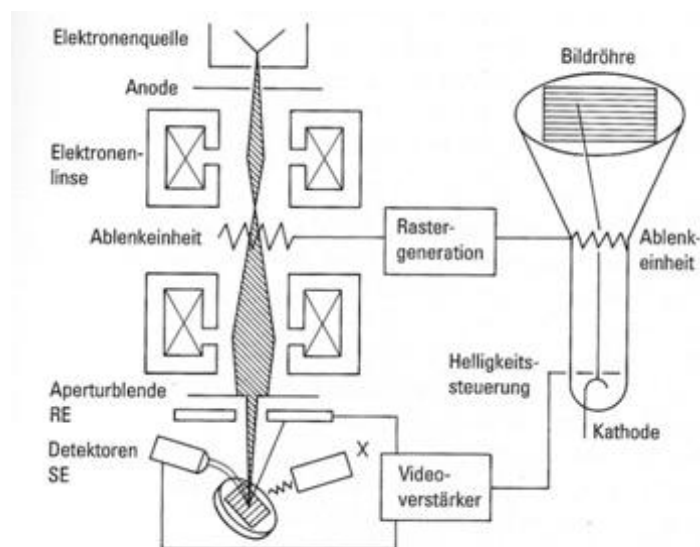


Abbildung 3-17: Schematische Darstellung eines Rasterelektronenmikroskops [28].

Für die Abbildung sind Feldstärken bis zu $6 \cdot 10^7$ V/cm erforderlich. Dazu wird ein Wolframeinkristall in Orientierung mit einer sehr feinen Spitze ($r < 0,1 \mu\text{m}$) verwendet. Aus der Anzahl der Elektronen pro Fläche ergibt sich die Emissionsstromdichte (Brightness). Um einen möglichst hoch fokussierten Elektronenstrahl zu erzeugen, wird der Strahlquerschnitt durch elektromagnetische Linsen verkleinert (Crossover).

Für den Betrieb der Kathoden sind Zusammenstöße von Elektronen mit Gasmolekülen zu vermeiden (Streuung), man benötigt man ein Vakuum, das im Bereich von 10^{-4} mbar liegt. Der Elektronenstrahl dringt in die Probe ein und erzeugt Wechselwirkungen mit den Atomen des zu untersuchenden Materials in der sogenannten Anregungsbirne (Abb. 3-18), dessen Ausmaß von Parametern wie der Beschleunigungsspannung, der Dichte und von der mittleren Ordnungszahl des Materials abhängig ist. So wird eine Vielzahl an unterschiedlichen Signalen erzeugt. Hierbei kann zwischen zwei grundsätzlichen Mechanismen unterschieden werden:

Elastische Streuung: Ein Primärelektron (PE) gerät in den Wirkungsbereich des elektrischen Feldes eines positiv geladenen Atomkerns und wird durch das Coulombfeld ohne Energieverlust aus der ursprünglichen Bahn abgelenkt → Rückstreuелеktronen, erlauben Rückschlüsse auf die Struktur.

Unelastische Streuung: Tritt bei der Wechselwirkung von PE mit den Elektronen der Atomhülle und mit dem Atomkern auf und führt zu einem Energieverlust des einfallenden Elektrons. Die Größe des Wechselwirkungsvolumens ist von der Anregungsenergie und der Ordnungszahl der Objektmaterie abhängig.

Die freigesetzte charakteristische Röntgenstrahlung lässt Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung zu [27].

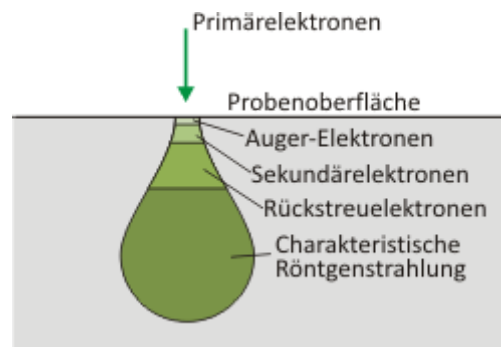


Abbildung 3-18: Anregungsbirne REM [32].

3.2.4 Härteprüfung

Als weitere Untersuchungsmethode kam die Härteprüfung nach Vickers zum Einsatz (EN ISO 6507-1). Durchgeführt wurden im Zuge dieser Arbeit eine Härteprüfung HV 0,3 im Kleinlastbereich (1,961-49,03 N Prüfkraft), da dieser im gegebenen Fall am geeignetsten ist [28]. Diese entsprechende Härteprüfmaschine

befindet sich im „Österreichische Gießerei Institut“ in Leoben. Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgte in Microsoft Excel.

3.2.5 Metallgranulat Regenerierung

Um die Recyclierbarkeit des Metallgranulat zu überprüfen, wurde das Metallgranulat-Bindergemisch bei 500°C im Wärmebehandlungsofen erhitzt. Nach vollständiger Vergasung des Binders wurde das regenerierte Metallgranulat für einen erneuten Einformprozess verwendet.

4 Resultate

Untersucht wurde einerseits der Einfluss der Mischungsrezeptur, der Aushärtungszeit und der Härtemethode auf die mechanischen Eigenschaften der Kerne. Alle Tests wurden daher sofort, nach 1 Std, 4 Std und 24 Std nach dem Schießen für jede Mischung durchgeführt. Ein weiterer Parameter der getestet wurde ist das Aushärteverfahren. So wurden einige Mischungen Cold-Box oder Warm-Box gehärtet. Da die Quarzsandmischung am häufigsten Anwendung findet, wurde sie als Standard zum Vergleich mit anderen Formgrundstoffen ausgewählt.

Da auch die Oberflächenbeschaffenheit und die Packungsdichte auf Grund der Binderbrücken Einfluss auf die Festigkeit der Kernproben haben, wurden zur Veranschaulichung Rasterelektronenmikroskopbilder erstellt. Im Folgenden sind die Ergebnisse graphisch dargestellt (Abb. 4-3 bis 4-7). An der Abszisse ist die Verformung der Proben in mm aufgetragen. An der Ordinate die Biegefestigkeit in N/cm².

4.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der untersuchten Formgrundstoffe sind in Abbildung 4-1 dargestellt. Hauptanteil für Quarzsand (H32) sind Körner mit Korndurchmesser 0,32 mm, bei Zirkonsand 0,1 mm, bei Chromitsand 0,19 mm, bei Bauxitsand 0,1 und 0,25 mm, der zwei Maxima in der Korngrößenverteilung aufweist und bei Edelstahlmetallgranulat 0,3 mm (siehe Abb. 4-1). Da das Edelstahlgranulat ein industriell gefertigtes Produkt ist, hat es, wie zu erwarten, eine sehr geringe Korngrößenbandbreite. Rund 70% des Granulats liegen in einem Bereich von $0,3 \pm 0,05$ mm. Auch der Zirkonsand und der Quarzsand weisen einen relativ engen Korngrößenbereich auf. Der Bauxit- und Zirkonsand ist gleichmässiger verteilt. Hier verteilen sich 70% der Korngrößen auf etwa 0,3 mm Korngröße.

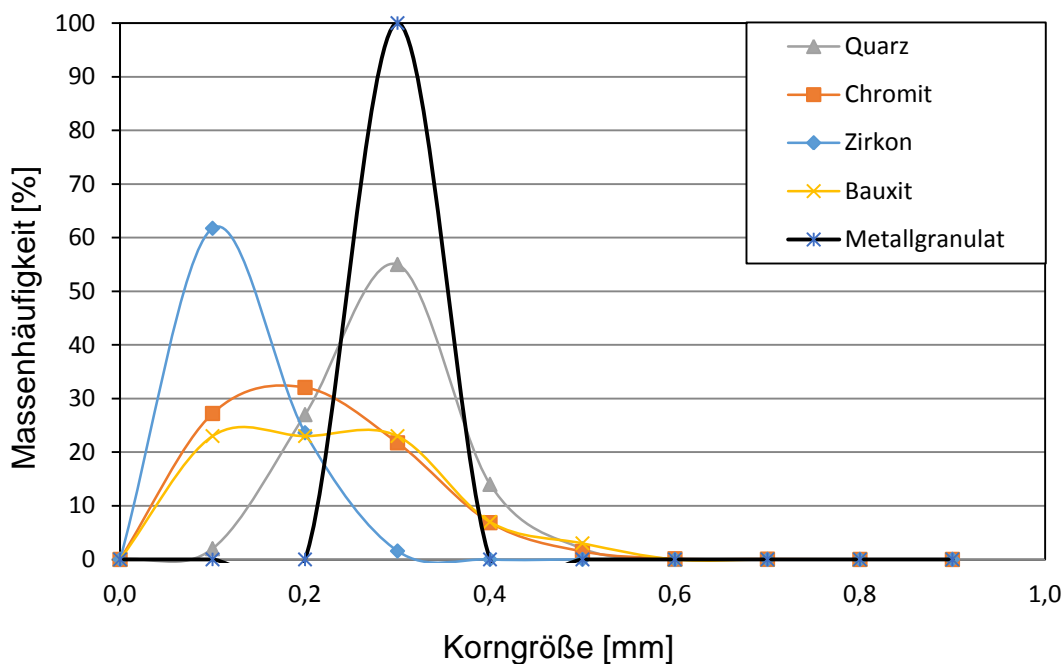


Abbildung 4-1: Korngrößenverteilungen (Sieblinien) der Sande und des Metallgranulats (schematisch).

4.2 Rasterelektronenmikroskopie

Bei der Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop wurden stark vergrößerte Bilder der verschiedenen Sand- und Metallkörner angefertigt, um die Kornform und Oberflächenbeschaffenheit beurteilen zu können. Abbildung 4-2 zeigt eine schematische Darstellung verschiedener Kornformen. Diese diente als Vorlage zur Beschreibung der mikroskopisch beobachteten Kornform.



Abbildung 4-2: Überblick über verschiedene Kornformen [34].

Die Körner vom untersuchten **Quarzsand** sind **gerundet** und weisen eine glatte Oberfläche auf. Die Kornverteilung ist sehr homogen, die Körner sind leicht länglich (siehe Abb.4-3).

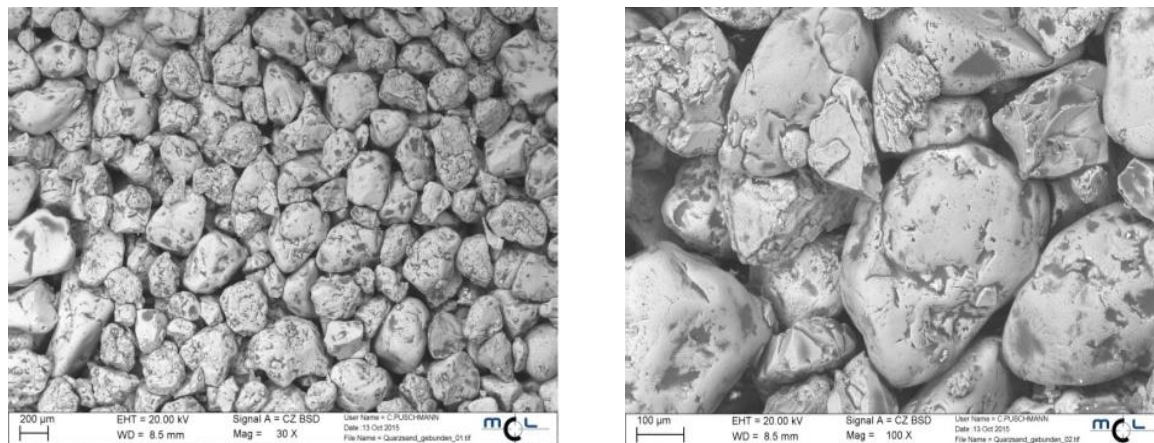


Abbildung 4-3: Quarzsand-Mischung. Rasterelektronenmikroskopbilder der Kernsandproben. Rechts: 30X; Links: 100X.

Der getestete **Chromitsand** hat leicht längliche, **rundkantige mit flachen Abschnitten (Facetten)** Körner mit glatter Oberfläche und einer Korngröße von 0,25 mm (Abb. 4-4).

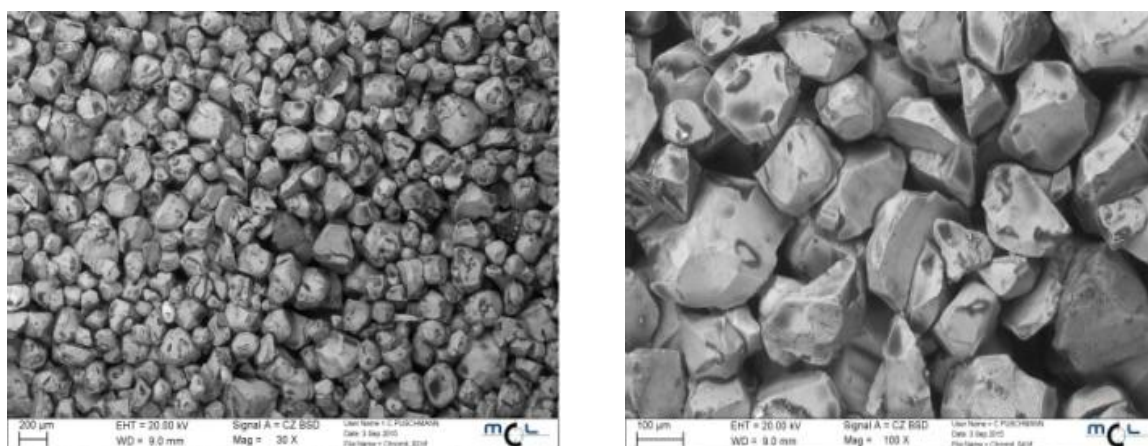


Abbildung 4-4: Chromitsand-Mischung. Rasterelektronenmikroskopbilder der Kernproben. Rechts: 30X; Links: 100X.

Der **Zirkonsand** hat auch **kantige** Körner mit einer durchschnittlichen Korngröße von 0,1 mm (Abb. 4-5). Seine Form und Oberflächenbeschaffenheit ist eher glatt und mit der des Quarz- und Chromitsandes vergleichbar, obwohl sich die Korngröße unterscheidet. Diese Eigenschaften bedingen eine hohe Anzahl an

Hohlräumen und suboptimale Binderbrücken. Die Binderkraft wird dadurch aber positiv beeinflusst.

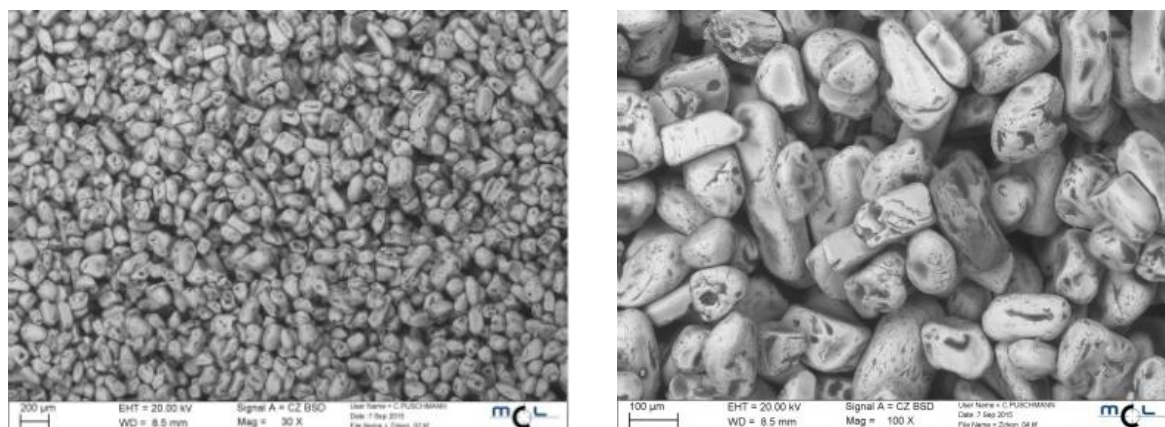


Abbildung 4-5: Zirkonsand-Mischung. Rasterelektronenmikroskopbilder der Kernproben. Rechts: 30X; Links: 100X.

Der **Bauxitsand** besteht aus einer Mischung von fast perfekt **gerundeten** Körnern, mit einer Korngröße von 0,1 und 0,3 mm (Abb. 4-6) zu je gleichen Teilen. Die kleinen Kugeln füllen die Zwischenräume sehr gut aus. Die Packungsdichte ist daher ungleich höher als bei Sanden mit gleichmäßiger Korngrößenverteilung. Auch die Zahl der Binderbrücken steigt, was eine hohe Festigkeit bewirkt. Bei Mischungen dieser Art kann auf Grund der vielen Binderbrücken, oft Bindemittel eingespart werden. Die Oberfläche ist sehr glatt und es sind kaum Poren zu erkennen. Weitere Vorteile sehr gut gerundeter Sande sind gute Fließeigenschaften und gute Gasdurchlässigkeit, auch wenn diese durch den Korngrößenmix wiederum verringert wird.

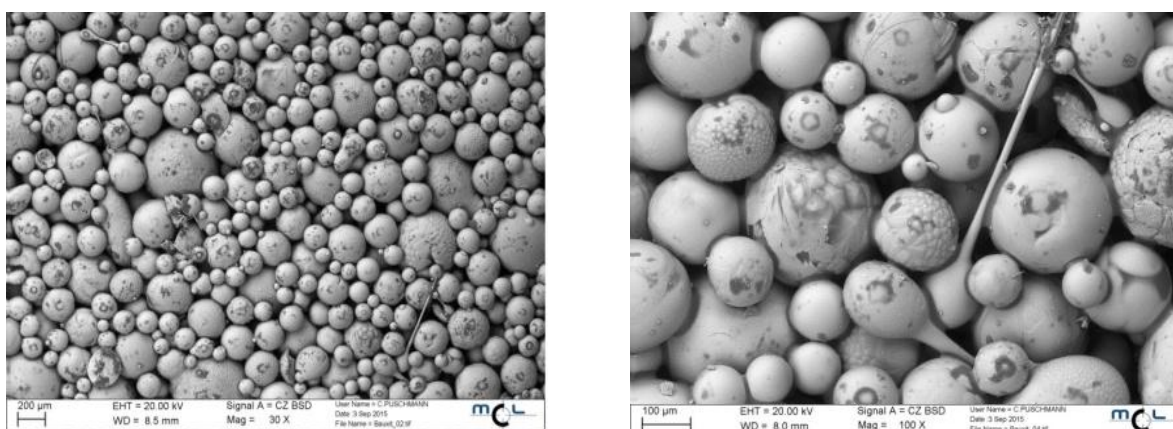


Abbildung 4-6: Bauxitsand-Mischung. Rasterelektronenmikroskopbilder der Kernproben. Rechts: 30X; Links: 100X.

Metallgranulat wurde auch in verschiedenen Mischungen getestet, siehe dazu Abbildung 4-7. Abb. 4-7 b zeigt eine REM Aufnahme des reinen Metallgranulats. Dieses weist **stark gerundete** Körner auf, die keinerlei Oberflächendefekte besitzen und eine sehr glatte Oberfläche zeigen. Hohe Gasdurchlässigkeit und gute Fließeigenschaften sind zu erwarten. Zirkonsand und Quarzsand haben weniger runde Körner und ihre Oberflächen sind weniger glatt. Dies kann bei den Mischungen zu verschlechterter Gasdurchlässigkeit führen, vor allem bei der Zirkonsandmischung, da die beigemengten Zirkonkörner einen kleineren Korndurchmesser aufweisen. Dafür sind stark verbesserte Stabilitätswerte zu erwarten.

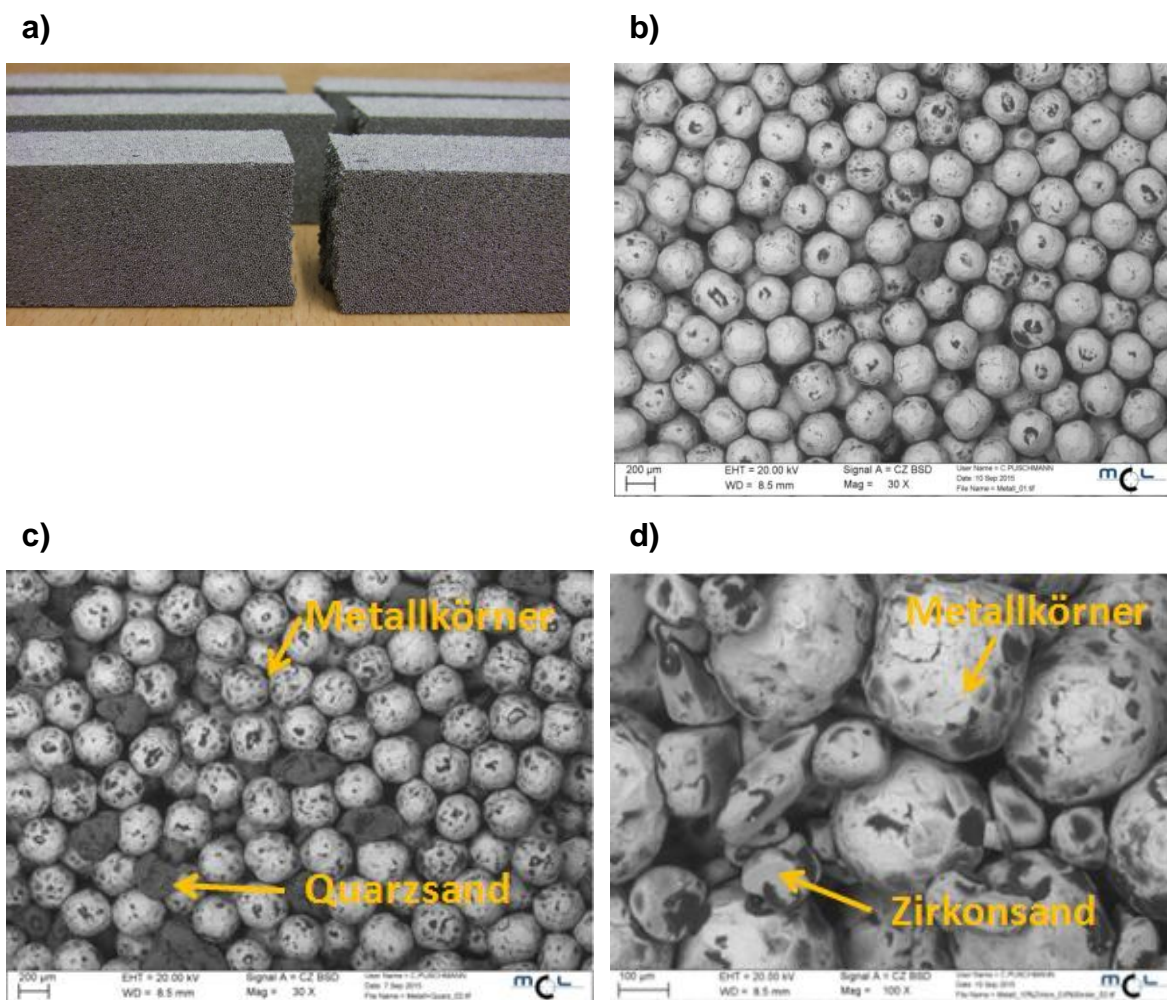


Abbildung 4-7: Metallgranulat und Metallgranulat-Mischungen. a: Foto der Kerne, Rasterelektronenmikroskopbilder b: Metallgranulat 30X, c: Metallgranulat mit 20% Quarzsand, 30X, d: Metallgranulat mit 10% Zirkonsand, 100X.

4.3 Biegefestigkeitsprüfungen von klassischen Quarzsand-Kernen mit Cold-Box-Härtung.

Für die Prüfung der Biegefestigkeit wurden jeweils 3 bis 5 Proben pro Mischung getestet. Die Testergebnisse jeder Mischung sind dokumentiert (Tab. 4-1 bis 4-4) und als Funktion der Biegefestigkeit und Verformung dargestellt. Zur besseren Übersicht wurden die Ergebnisse (Graphen) der einzelnen Proben danach gemittelt (die Graphen wurden bis zum Maximalwert gezeichnet). Nur für den Quarzsand sind anschließend alle Ergebnisse der einzelnen Proben zusammen mit ihrer Mittelwertslinie (rot) einmalig in einer Grafik zusammengefasst. Für alle anderen Grafiken sind die Ergebnisgraphen der Mischungen als oben erwähnte Mittelwertslinien (bis zum Maximum gezeichnet) zu verstehen. Zur Ermittlung der Mittelwertslinie wurden die Messdaten in Microsoft Excel sortiert und die Biegefestigkeiten bei festgelegten Verformungswerten gemittelt und als neuer Graph wie erwähnt in rot (bei den Quarzsanddiagrammen) geplottet. Außerdem wurde ein Mittelwert der Maximalwerte der einzelnen Proben berechnet (dieser entspricht nicht dem Maximalwert der Mittelwertslinie), (vergleiche Abb. 4-8 bis 4-12).

Tabelle 4-1: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der Sofort-Prüfung.

Sofort	
Versuch	Maximalwert [N/cm ²]
1	161,5
2	204,3
3	176,8
4	200,9
5	188,2
Mittelwert 186,0	

In Tabelle 4-1 sind die Ergebnisse der Sofort-Prüfung dargestellt. Es wurden 5 Proben getestet. Die kleinste Biegefestigkeit hat die erste Probe mit 161,5 N/cm²,

den Maximalwert weist die zweite Probe mit 204,3 N/cm² auf. Der Mittelwert beträgt 186 N/cm².

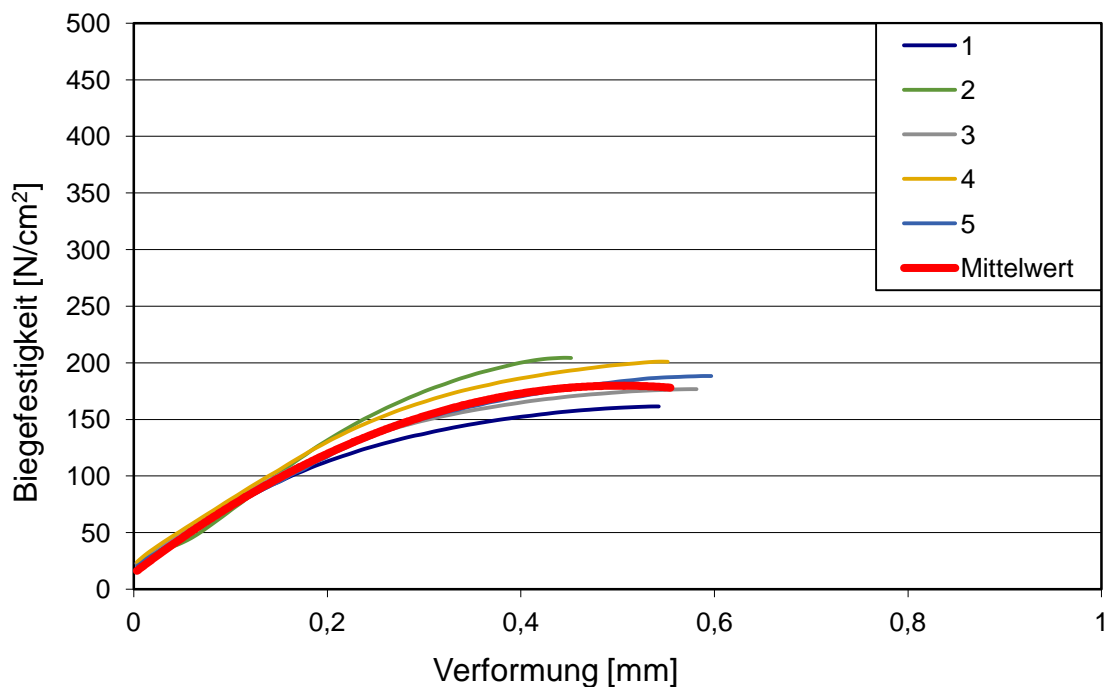


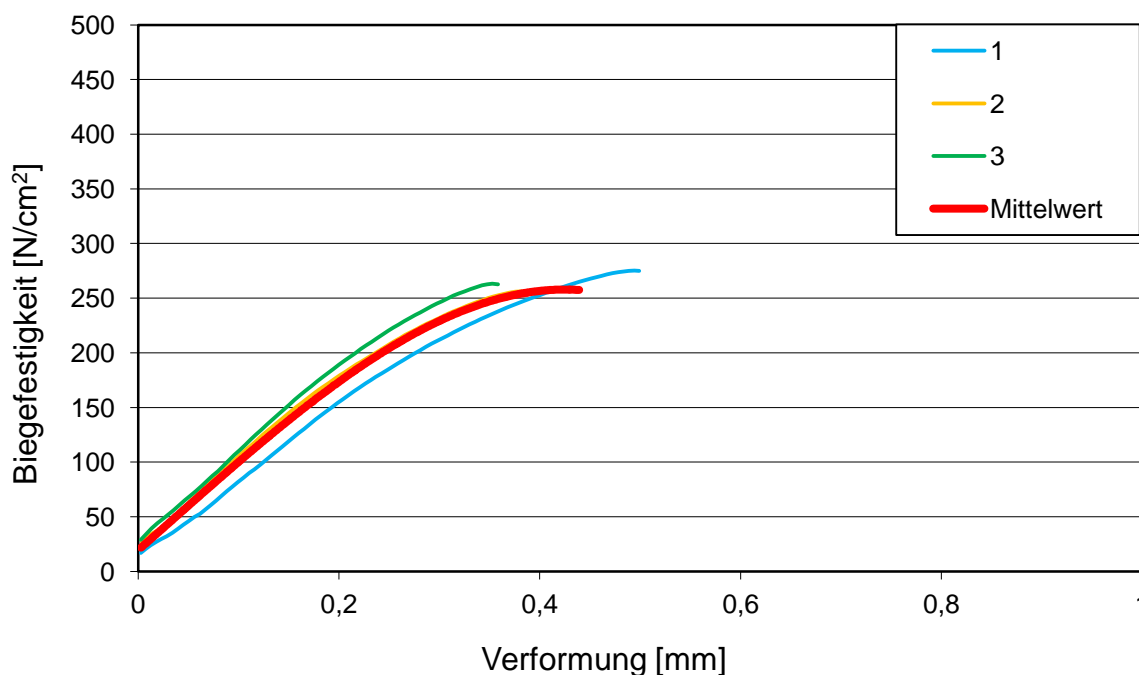
Abbildung 4-8: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der Sofort-Prüfung.

Abbildung 4-8 zeigt den Verlauf der Biegefestigkeit über die Verformung für die Quarzsand-Mischung. Die Kurvenschar zeigt einen stetigen Anstieg bei relativ geringer Streuung um die Mittelwertskurve. Am Anfang ist der Kurvenverlauf beinahe linear (Hinweis auf Elastizität). Die Verformung liegt im typischen Bereich, bei etwa 0,5 mm.

Tabelle 4-2: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 1 Std-Prüfung.

1 Std	
Versuch	Maximalwert [N/cm ²]
1	275,2
2	256,0
3	263,2
Mittelwert 264,8	

In Tabelle 4-2 sind die Ergebnisse der 1 Std-Prüfung dargestellt. Es wurden 3 Proben getestet. Die kleinste Biegefestigkeit hat die zweite Probe mit 256 N/cm², den Maximalwert weist die erste Probe mit 275,2 N/cm² auf. Der Mittelwert beträgt 264,8 N/cm².

**Abbildung 4-9:** Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 1 Std-Prüfung.

Die Werte der Biegefestigkeit nach 1 Std Aushärtung liegen erwartungsgemäß oberhalb der Werte bei sofortiger Prüfung (0 Std) (aufgrund der fortgeschrittenen Aushärtung) und die Kurven steigen steiler, sodass geringfügig niedrigere Verformungen erzielt wurden.

Tabelle 4-3: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 4 Std-Prüfung.

4 Std	
Versuch	Maximalwert [N/cm ²]
1	303,0
2	255,0
3	274,0
Mittelwert 277,3	

In Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse der 4 Std-Prüfung dargestellt. Es wurden 3 Proben getestet. Die kleinste Biegefestigkeit hat die zweite Probe mit 255 N/cm², der Maximalwert besitzt die erste Probe mit 303 N/cm². Der Mittelwert beträgt 277,3 N/cm².

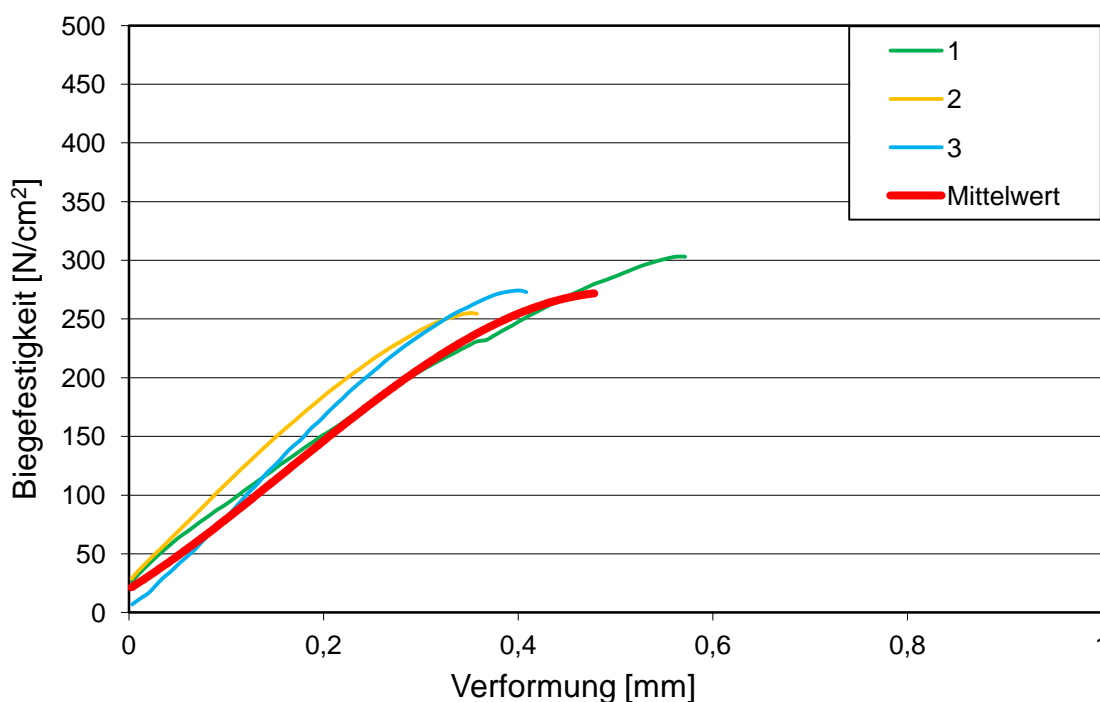


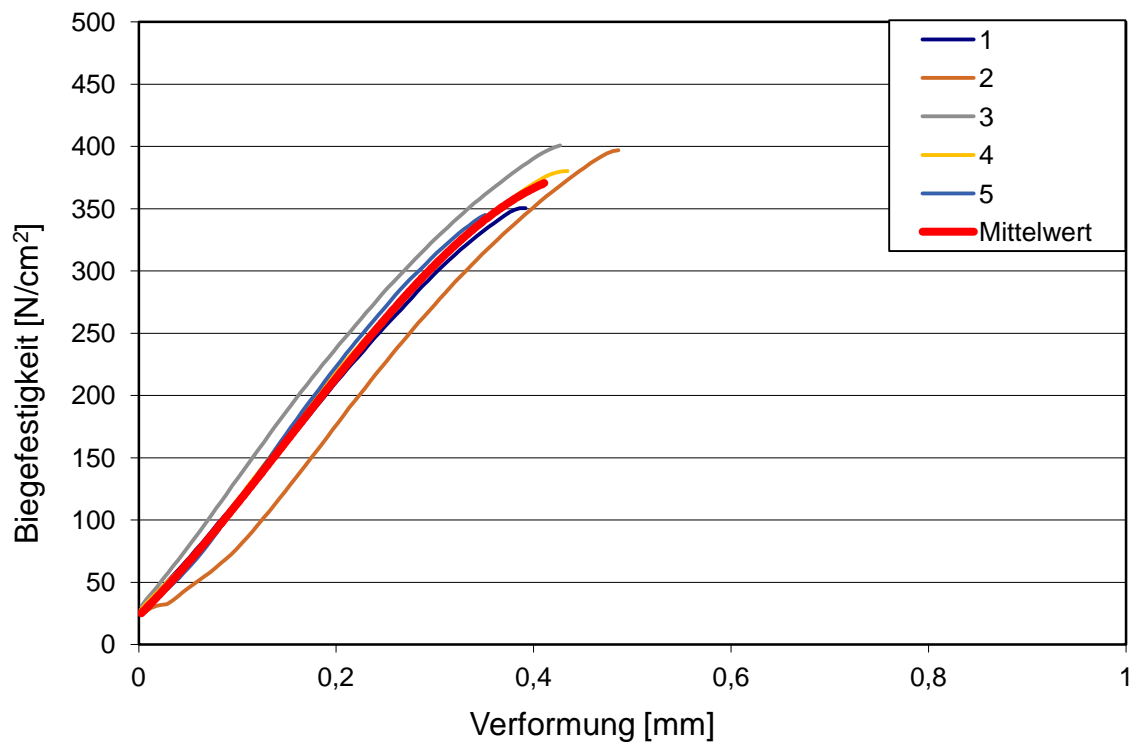
Abbildung 4-10: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 4 Std-Prüfung.

Bei den Proben die 4 Stunden ausgehärtet wurden, steigen die Kurven über einen sehr weiten Bereich linear an und streuen von Messbeginn relativ konstant gering bis zum Maximalwert von 277,3 N/cm² der den Aushärtungs Fortschritt gegenüber 0 und 4 Std widerspiegelt.

Tabelle 4-4: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 24 Std-Prüfung.

24 Std	
Versuch	Maximalwert [N/cm ²]
1	350,0
2	396,0
3	400,0
4	380,0
5	344,0
Mittelwert 371,8	

In Tabelle 4-4 sind die Ergebnisse der 24 Std-Prüfung dargestellt. Es wurden 5 Proben getestet. Die kleinste Biegefestigkeit hat die fünfte Probe mit 344 N/cm², den Maximalwert weist die dritte Probe mit 400 N/cm² auf. Der Mittelwert beträgt 371,8 N/cm².

**Abbildung 4-11:** Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 24 Std-Prüfung.

Wie zu erwarten zeigen die Proben, nach 24 Stunden Aushärtezeit die höchsten Festigkeitswerte, bei einer relativ steilen Steigung der Kurven mit Auswirkung auf die Steifigkeit der Biegeproben. Die Verformungswerte liegen wiederum in einem Bereich um 0,45 mm. Die Streuung der Kurven ist ähnlich jener, der 4 Std Proben.

Zur besseren Vergleichbarkeit der nachfolgenden Messungen ist die Biegefestigkeit in allen folgenden Diagrammen bis zu einem Achsenmaximum von 1000 N/cm² aufgetragen. In den folgenden Diagrammen sind die Testergebnisse der verschiedenen Aushärtezeiten als Mittelwerte dargestellt (wie für die Quarzsandmischung, siehe Abb. 4-12).

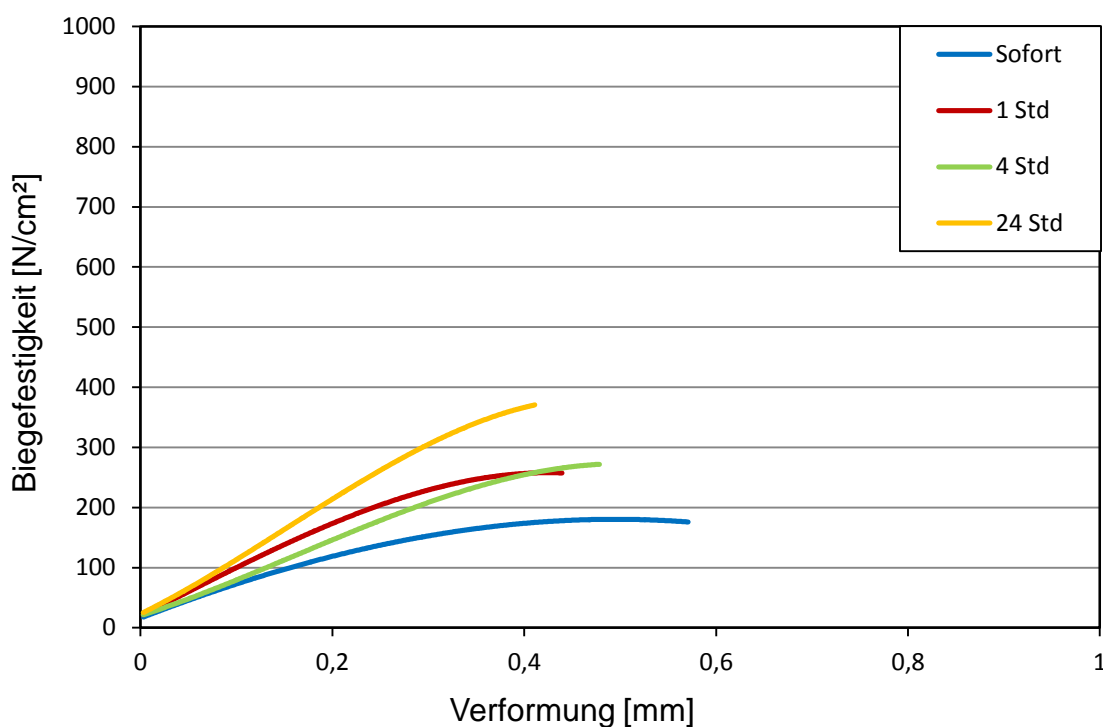


Abbildung 4-12: Übersicht der gemittelten Ergebnisse der Biegeprüfung mit Quarzsand-Mischung.

Die Ergebnisse für den Quarzsand zeigen einen bemerkenswerten Anstieg der Biegefestigkeit von der „Sofortprobe“ zu den Proben nach 1 und 4 Stunden, die ähnliche Festigkeitswerte zeigen (vgl. Abb. 4-12). Ein weiterer Sprung in der Festigkeit zeigt sich nach 24 Std Aushärtezeit, auf 371,8 N/cm². Die Verformung bleibt in allen Fällen ungefähr gleich, bei ca. 0,45 mm.

4.4 Biegefestigkeitsprüfungen von alternativen Formstoffen – Chromitsand-, Zirkonsand- und Bauxitsand-Kerne mit Cold-Box-Härtung.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Biegefestigkeitsprüfung mit speziellen Sanden mit Cold-Box Binder dargestellt. Jeder Graph stellt wiederum eine Mittelwertlinie aus den Werten von drei bis fünf Prüfungen dar. Die Rezepturen sind in Tab. 3-2 zusammengefasst.

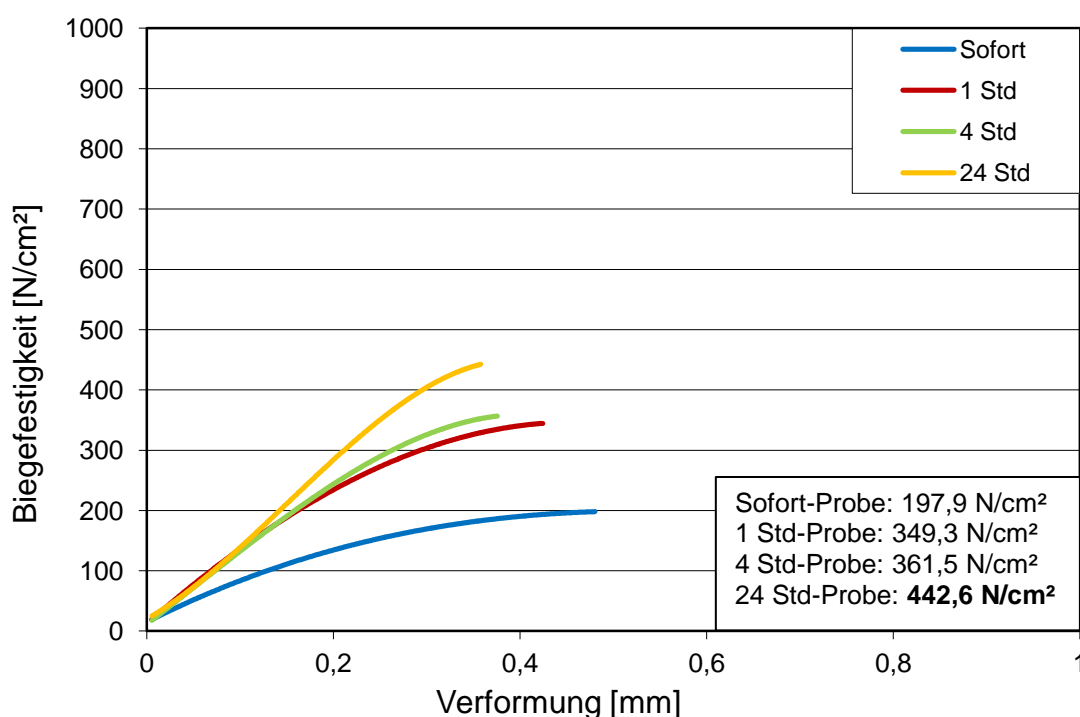


Abbildung 4-13: Übersicht der gemittelten Ergebnisse der Biegeprüfung mit Chromitsand-Mischung.

In Abbildung 4-13 sind die Ergebnisse der **Chromitsand-Mischung** dargestellt. Die kleinste Biegefestigkeit hat die Sofort-Probe mit 197,9 N/cm², den Maximalwert weist die 24 Std-Probe mit 442,6 N/cm² auf. Die Steigungen weisen anfänglich einen gemeinsamen Verlauf auf, mit Ausnahme der Sofortprobe, diese steigt immer deutlich flacher und weist daher einen erheblich kleineren Maximalwert auf.

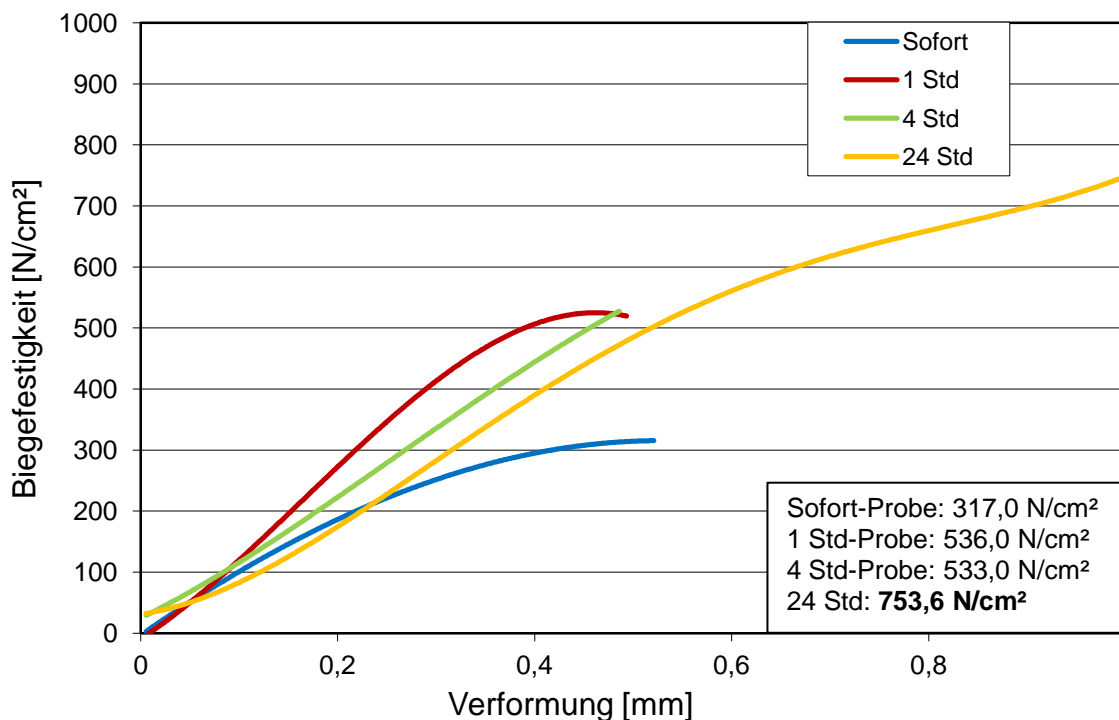


Abbildung 4-14: Übersicht der gemittelten Ergebnisse der Biegeprüfung mit Zirkonsand-Mischung.

In Abbildung 4-14 sind die Ergebnisse der **Zirkonsand-Mischung** dargestellt. Die kleinste Biegefestigkeit hat die Sofort-Probe mit $317,0 \text{ N/cm}^2$, den Maximalwert weist die 24 Std-Probe: $753,6 \text{ N/cm}^2$ auf. Der Verlauf des Graphen der Sofortprobe lässt sich sehr ähnlich wie beim Chromitsand beschreiben. Nach 1 und 4 Stunden Aushärtung werden ca. gleiche Biegefestigkeiten erzielt. Aber nach 24 Std Aushärtung zeigt sich eine wesentlich höhere Biegefestigkeit als zunächst zu erwarten wäre. Die Steigung dieser Kurve nimmt zwar ab dem Maximalwertbereich der 1- und 4-Stundenproben etwas ab, aber verläuft viel länger als die anderen. Dieser hohe Maximalwert nach 24 Std ist möglicherweise so zu erklären, dass die anderen Proben noch nicht vollständig ausgehärtet waren. Die Biegefestigkeiten liegen dennoch allgemein höher als bei der Chromitsandmischung. Möglicherweise ein Effekt einer katalytischen Reaktion der Sandmischung oder aber der weniger gerundeten Kornform des Sandes (siehe Abb. 4-5).

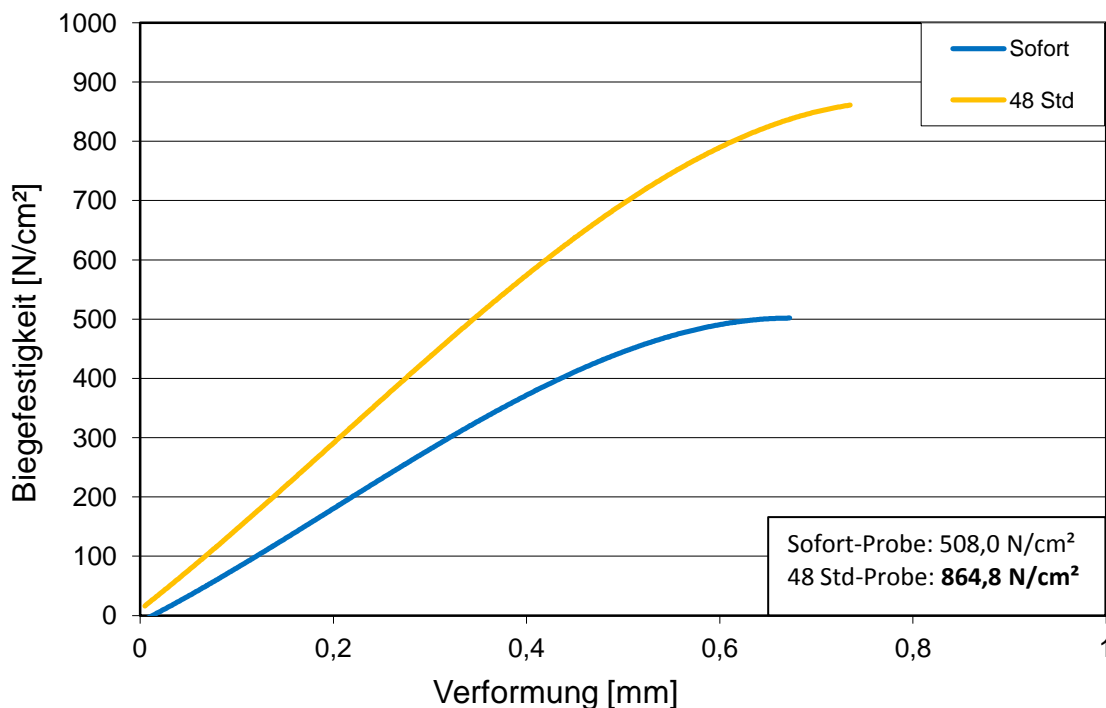


Abbildung 4-15: Übersicht der gemittelten Ergebnisse der Biegeprüfung mit Bauxitsand-Mischung.

In Abbildung 4-15 sind die Ergebnisse der **Bauxitsand-Mischung** dargestellt. Die kleinste Biegefestigkeit hat die Sofort-Probe mit $508,0 \text{ N/cm}^2$, den Maximalwert weist die 48 Std-Probe mit $864,8 \text{ N/cm}^2$ auf.

Bauxitsand weist sehr hohe Festigkeitswerte auf. Die Kurven verlaufen immer stetig steigend und sind über einen großen Bereich annähernd linear. Wie anzunehmen ist, ist die Festigkeit nach 48 Stunden Aushärtung höher als die der anderen Sandmischungen nach 24 Stunden. Dass der Bauxitsand dennoch fester ist als die anderen, lässt der hohe Wert der "Sofortprobe" vermuten. Die hohe Festigkeit ist mit großer Wahrscheinlichkeit ein Effekt der Korngrößenverteilung des Sandes und der gerundeten Form (siehe Abb. 4-1). Die Verformung ist mit etwas mehr als 0,6 mm allerdings auch etwas höher.

In Abbildung 4-16 und 4-17 sind die Ergebnisse der Biegefestigkeitsversuche von **Quarzsand-, Chromitsand-, Bauxitsand- und Zirkonsand-Mischungen** jeweils nach Null und 24 Std Aushärtezeit dargestellt. Den höchsten Wert hat die Bauxitsand-Mischung (48 Std).

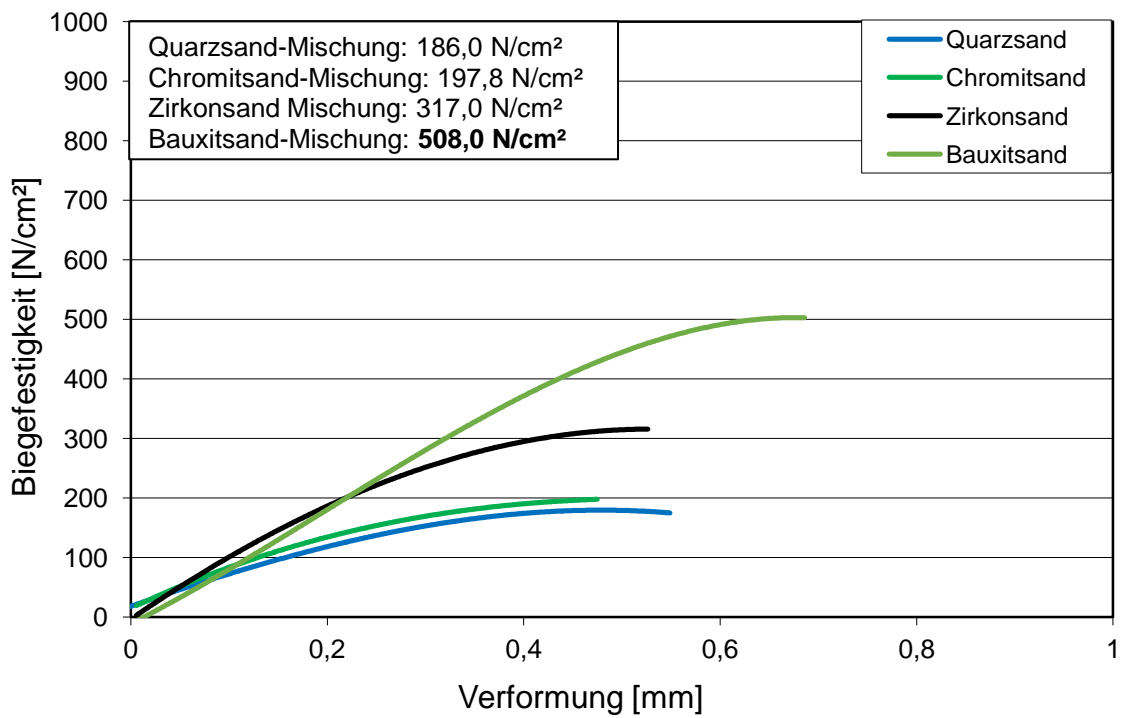


Abbildung 4-16: Ergebnisse der Biegeprüfung nach Sofort-Prüfung für Quarzsand-, Chromitsand-, Zirkonsand- Bauxitsandmischungen.

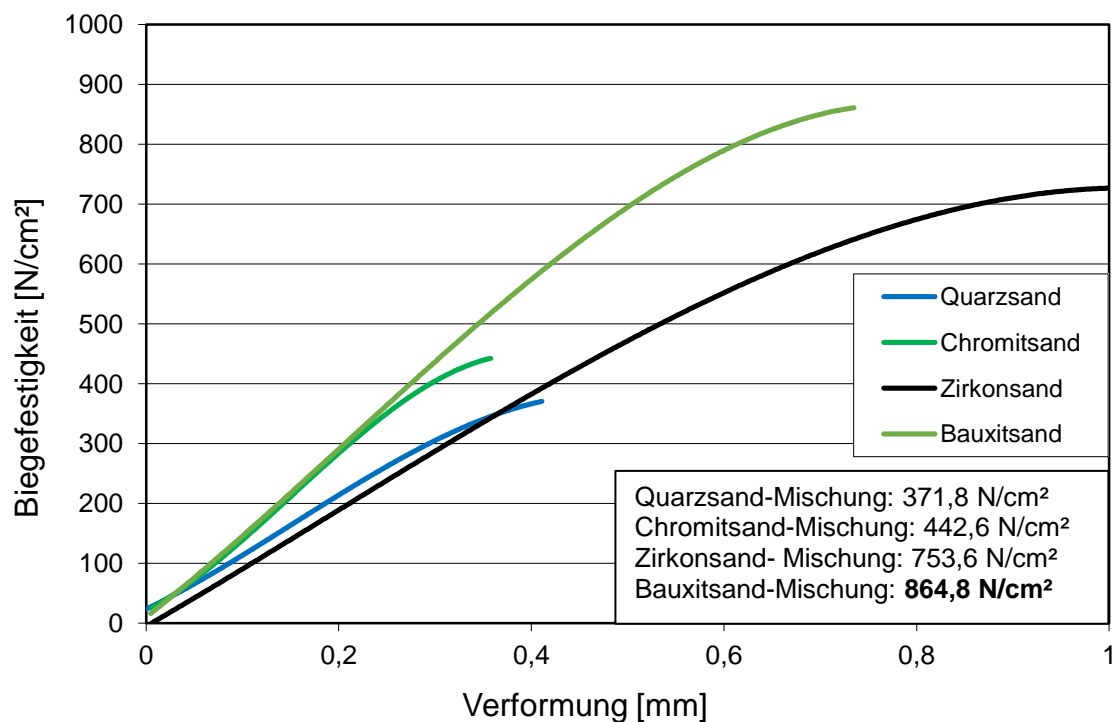


Abbildung 4-17: Ergebnisse der Biegeprüfung nach 24 (48)-Std-Prüfung für Quarzsand-, Chromitsand-, Zirkonsand- Bauxitsandmischungen.

Zusammenfassend lässt sich erläutern dass Quarzsand und Chromitsand in ihrer Festigkeit sehr ähnlich sind. Zirkonsand ist auf Grund seiner Kornform fester und Bauxitsand weist wegen seiner Korngrößenverteilung die höchsten Werte auf.

4.5 Biegefestigkeitsprüfungen von alternativen metallischen Formstoffen – Metallgranulat-Kerne mit Cold-Box-Härtung.

Biegefestigkeitsprüfungen mit Biegebalken aus **Metallgranulat-Mischungen**. Bei Sanden aus Metallgranulat entstanden Probleme beim Kernschießen. Die Maschine verstopfte und die Form für die Balken wurde nicht vollständig gefüllt. Die ermittelten Festigkeitswerte lagen weit unter den zu erwartenden Werten (siehe Abb. 4.18). Daher wurde dazu übergegangen die Mischung nicht zu schießen, sondern per Hand in die Form zu stampfen. Dadurch wurden wesentlich bessere Werte erzielt und alle Biegebalken aus Metallgranulat wurden folglich auf diese Weise hergestellt (Abb. 4-19 bis 4-22).

Zwei Proben wurden noch zusätzlich mit einem mittigen Kerneisen (KE) getestet (siehe Abb. 4-20 und 4-21).

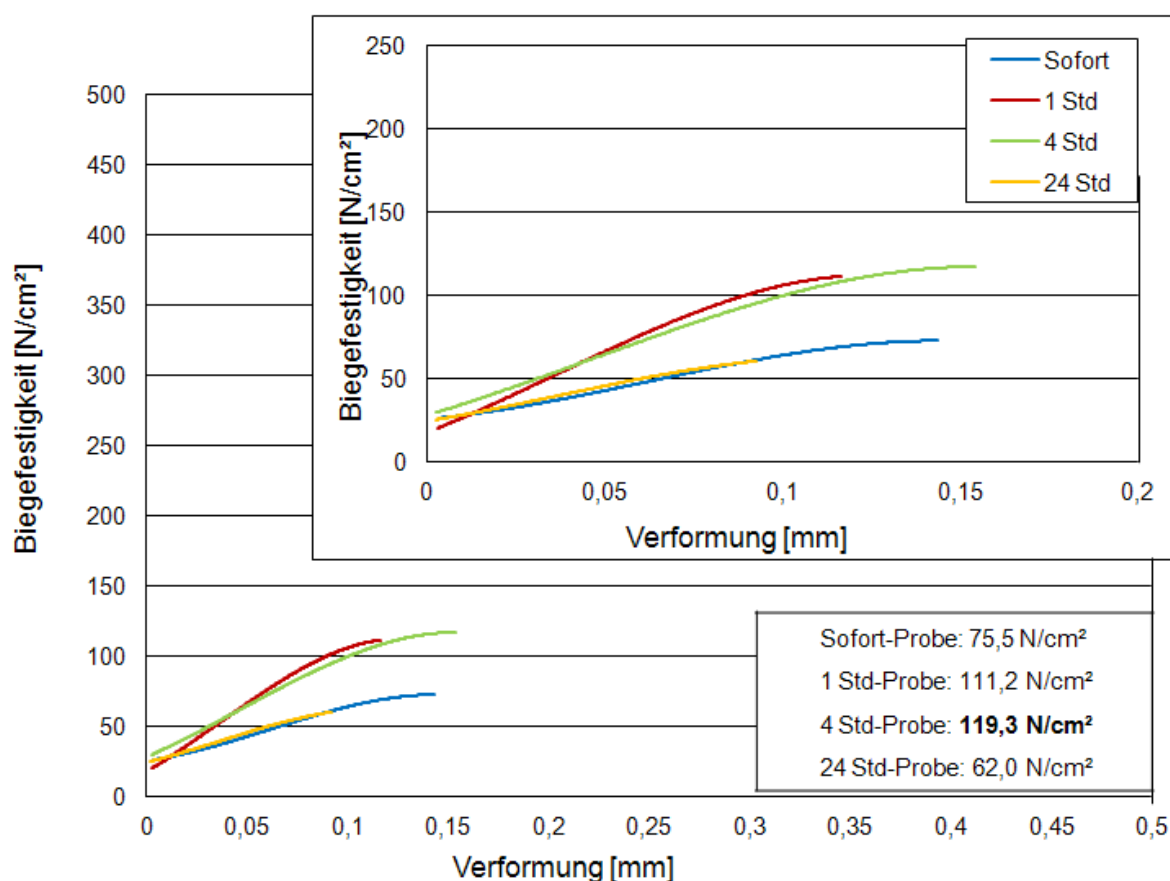


Abbildung 4-18: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung (geschossene Kerne).

Es zeigt sich überraschenderweise dass die 1 Std Probe den Maximalwert aufweist: 1 Std-Probe mit 281,0 N/cm². Die 4 Std- und 24 Std-Proben zeigen gleiche Biegefestigkeit: 164,0 N/cm² (Abb. 4-19).

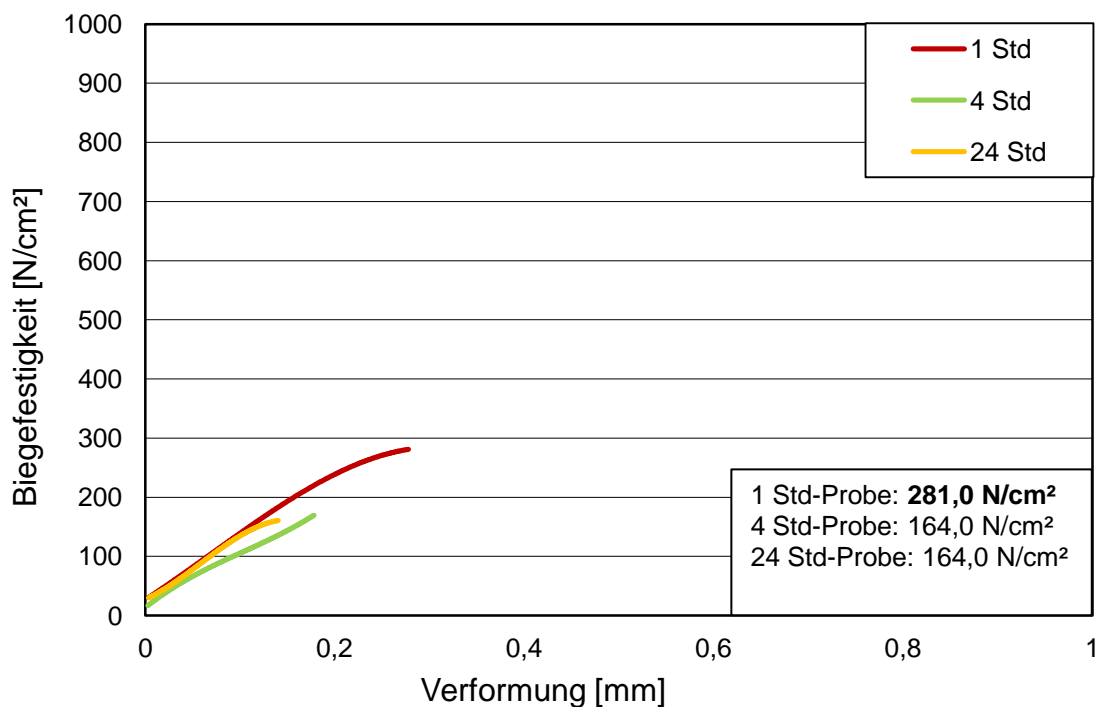


Abbildung 4-19: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung (gestampft).

Nach 1 Std Aushärtezeit ist die Verformung mit etwas mehr als 0,25 mm relativ gering und die Festigkeit ist fast doppelt so hoch wie bei den anderen Proben dieser Mischung. Die Verformungswerte der 4 und 24 Std Proben liegen wiederum in einem Bereich um 0,15-0,18 mm. Die Streuung der Kurven ist gering.

In Abbildung 4-20 und 4-21 sind die Ergebnisse der Proben aus **Metallgranulat mit feinem Anteil Quarzsand-Mischung** und mit **Quarzsand** (auch mit Kerneisen) dargestellt.

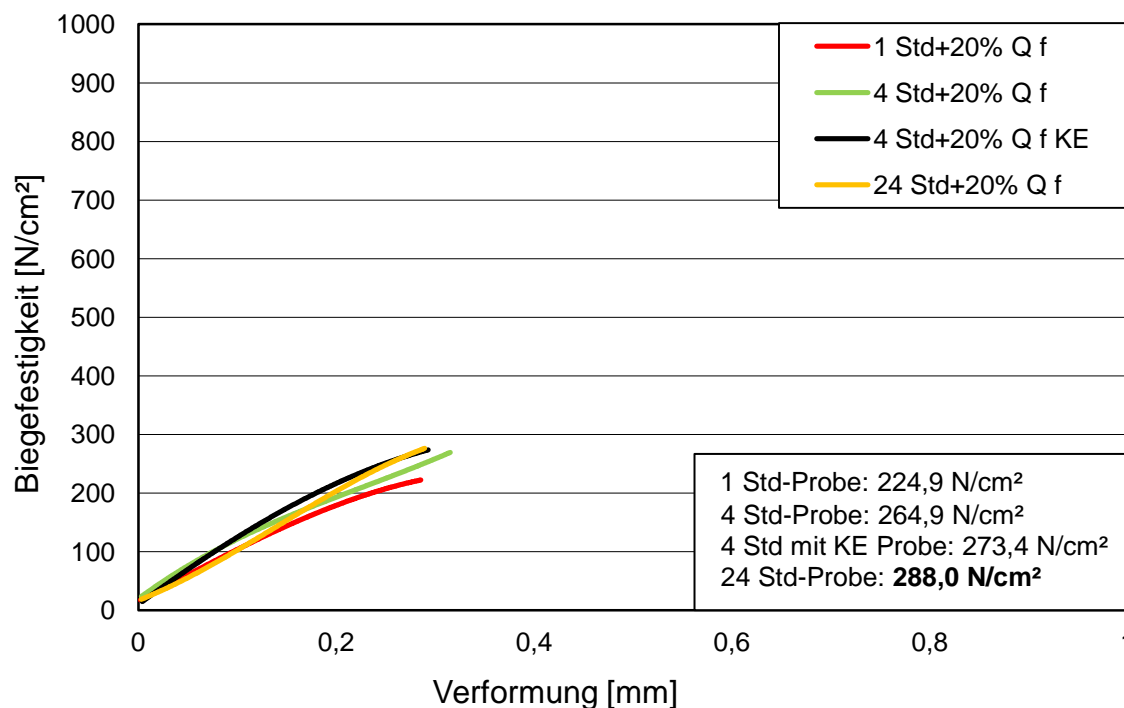


Abbildung 4-20: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung mit 20% Quarzsand (Q) Feinanteil (f) $\varnothing < 0,25$ mm und Kerneisen (KE).

Alle Kurven verlaufen sehr ähnlich. Sowohl Maximalwerte, Steigungen und Verformungen liegen alle im gleichen Bereich. Das Kerneisen in der 4 Std Probe hat keinen Einfluss auf die Festigkeit, wie auch bei MG+20% Qz - Mischung (Abb. 4-21), da es in der Mitte eingebracht wurde und sich in der neutralen Biegephase befindet.

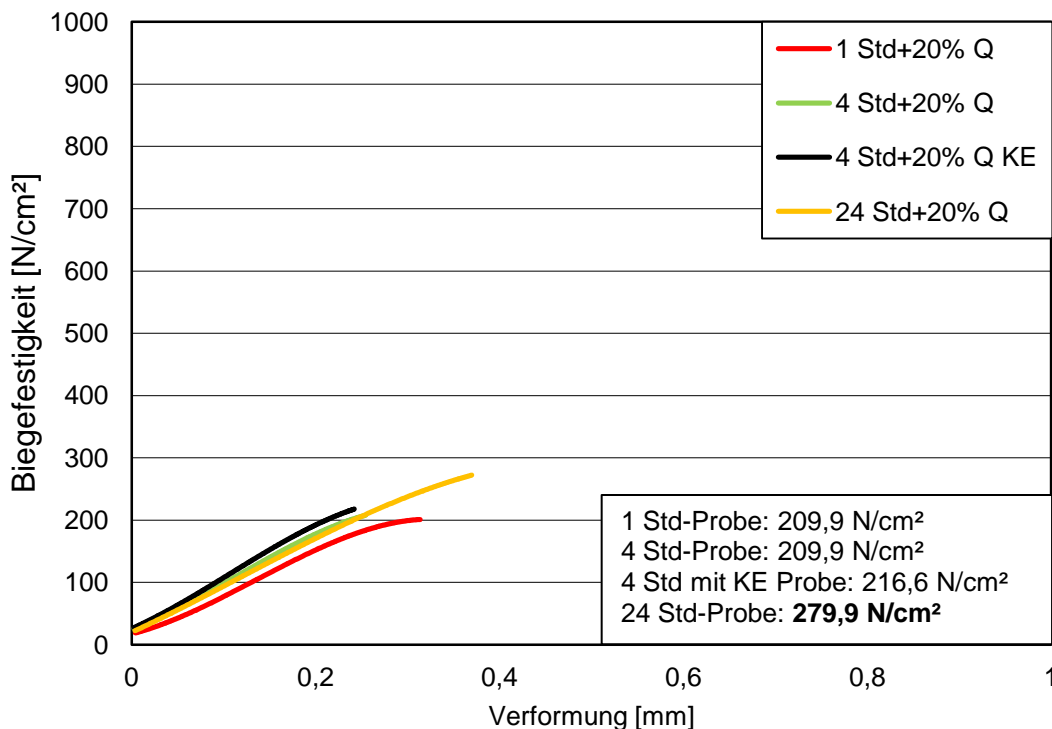


Abbildung 4-21: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung mit 20% Quarzsand und Kerneisen (KE).

Auch hier verlaufen die Kurven immer stetig steigend und sind annähernd linear. Bei den Proben nach 1 Std und 4 Std Aushärtung werden gleiche Biegefestigkeiten erzielt: 209,9 N/cm². Den Maximalwert weist die 24 Std-Probe mit 279,9 N/cm² auf, die Verformung ist mit etwas mehr als 0,38 mm allerdings etwas höher als bei anderen Proben. Im Vergleich mit den Proben aus Quarzsand-Mischung sind die Kurven geringfügig steiler und kürzer und erreichen nur geringe Verformungen. Aber die Biegefestigkeitswerte der Quarzsand-Mischung sind geringfügig höher.

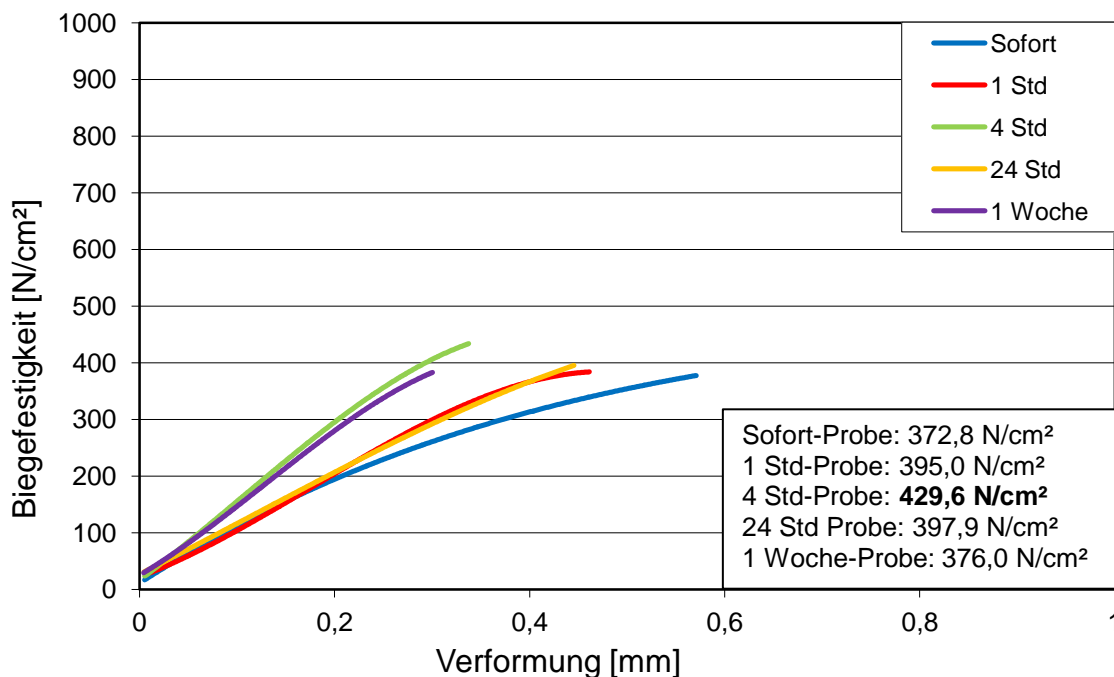


Abbildung 4-22: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung mit 10% Zirkonsand.

In Abbildung 4-22 sind die Ergebnisse der **Metallgranulat mit Zirkonsand-Mischung** dargestellt. Die kleinste Biegefestigkeit hat die Sofort-Probe mit 372,8 N/cm², den Maximalwert weist die 4 Std-Probe mit 429,6 N/cm² auf. Die Steigungen der 4 Std und 1 Woche zum einen, sowie die der restlichen Proben weisen zwei verschiedene Steigungen auf. Die Maximalwerte sind alle in einem Bereich um 400 N/cm². Der Graph der Sofortprobe wird bei 372,8 N/cm² etwas flacher und zeigt daher die größte Verformung mit 0,58 mm. Die Biegefestigkeit hat zwischen 0 Std und 4 Std Aushärtezeit zugenommen, aber bei 24 Std und 1 Woche Aushärtezeit wieder geringfügig abgenommen.

4.6 Vergleich von Biegefestigkeitsprüfungen Quarzsand-Kerne und Metallgranulat-Kerne mit Warm-Box-Härtung.

Es wurden 2 Bindersysteme mit Quarzsand getestet. Furanharz und Phenolharz. Den Maximalwert von **Furanharz** weist die 1 Std-Probe mit 488,0 N/cm² auf (Abb. 4-23). Die kleinste Biegefestigkeit hat die Sofort-Probe mit 332,4 N/cm².

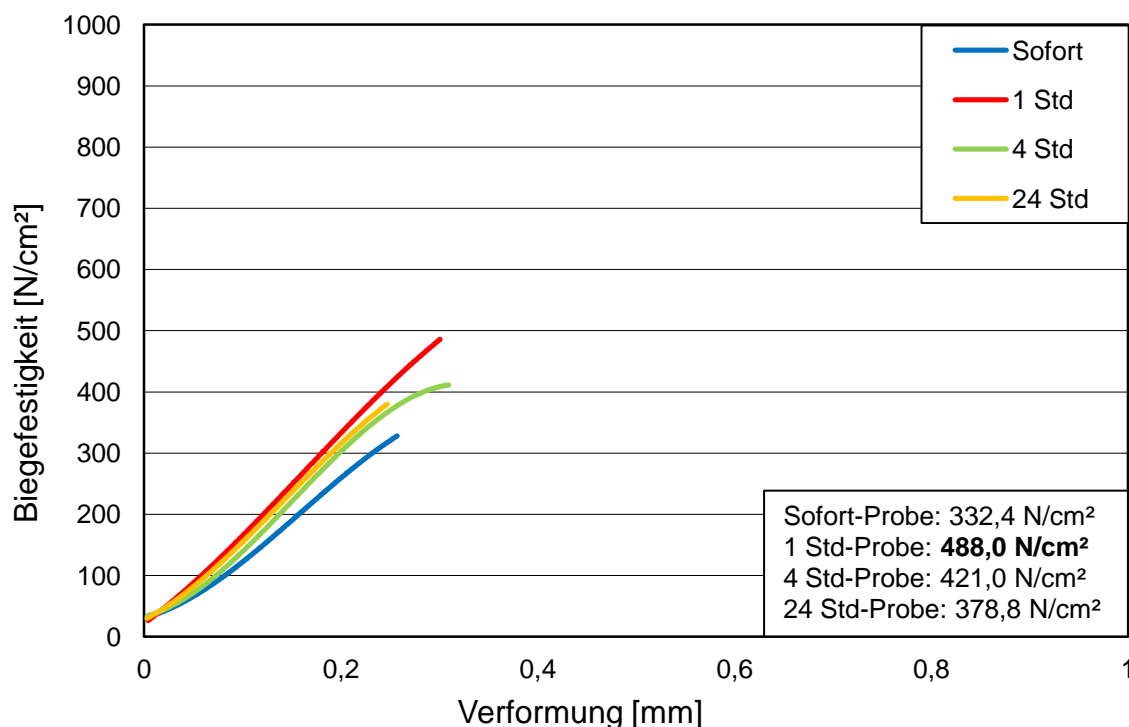


Abbildung 4-23: Ergebnisse der Biegeprüfung für Quarzsand-Mischung mit Furanharz (Warm-Box-Härtung).

Die zweite Mischung mit **Phenolharz** zeigt höhere Werte als die erste Mischung mit Furanharz (Abb.4-24). Die kleinste Biegefestigkeit hat die Sofort-Probe mit 575,0 N/cm², den Maximalwert weist die 4 Std-Probe mit 775,0 N/cm² auf.

Im Vergleich (Abb. 4-23, 4-24) zur Furanharz-Härtung sind sowohl die Festigkeitswerte als auch die Verformungswerte bei Phenolharz-Härtung um 30-40 % höher. Im Unterschied zur Cold-Box-Härtung ist der Verformung geringer und die Festigkeit ist deutlich höher.

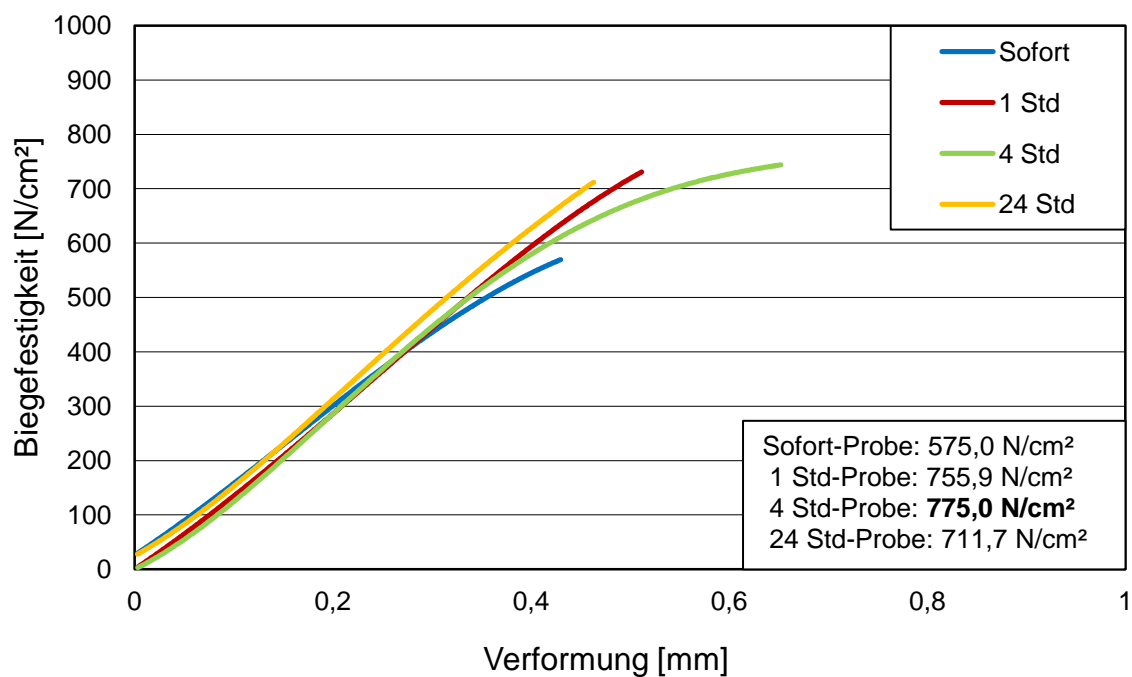


Abbildung 4-24: Ergebnisse der Biegeprüfung für Quarzsand-Mischung mit Phenolharz (Warm-Box-Härtung).

Mit **Metalgranulat** wurde ein zweites Bindersystem mit **Phenolharz** getestet. Die Ergebnisse zeigen sehr hohe Werte (Abb. 4-25). Die kleinste Biegefestigkeit hat die 24 Std-Probe mit 665,5 N/cm^2 , den Maximalwert weist die 4 Std-Probe mit 805,5 N/cm^2 auf.

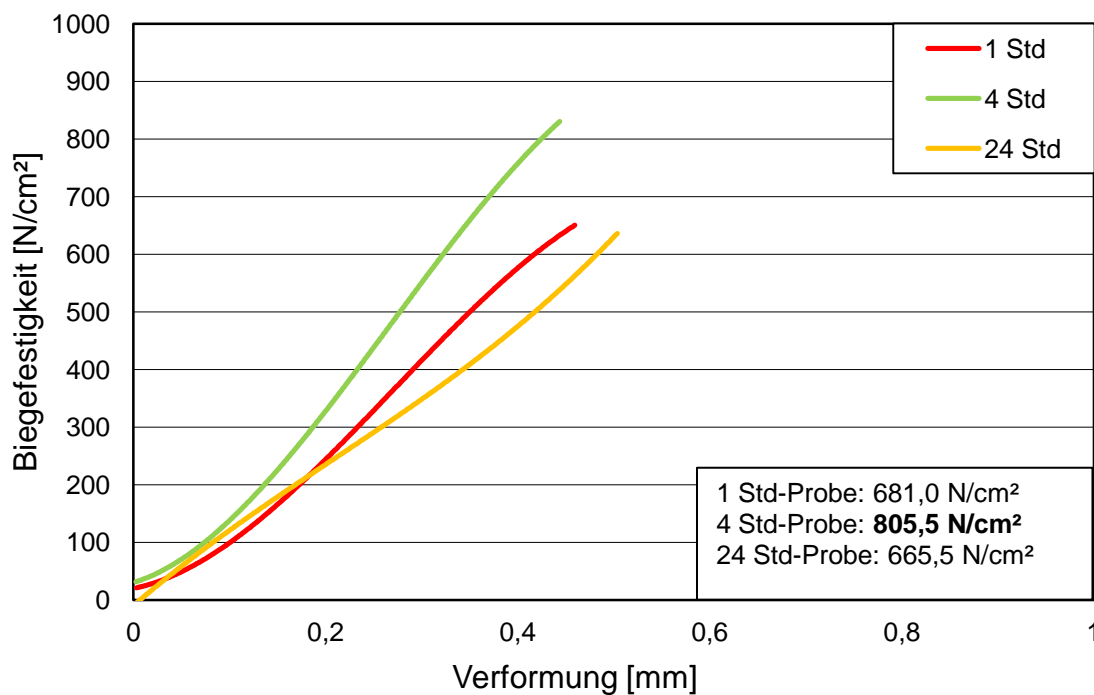


Abbildung 4-25: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung mit Phenolharz. Aushärtung (Warm-Box) in der Form 2 Min.

Wie in Abbildung 4-25 ersichtlich erreichen die Graphen der Proben hohe Steigungen und die Verformungswerte liegen wie bei den mineralischen Sanden in einem Bereich um 0,45 mm. Die 24 Std Probe zeigt nicht den höchsten Wert, ein möglicher Grund könnte eine unerwünschte Wasseraufnahme sein.

4.7 Biegefestigkeitsprüfungen von Metallgranulat-Regenerat-Kerne mit Cold-Box-Härtung.

In Abbildung 4-26 sind die Ergebnisse der **Metallgranulat-Regenerat-Mischung** dargestellt. Eine Probe wurde zu Versuchszwecken zweimal begast (1 Std ausgehärtet). Die kleinste Biegefestigkeit hat die Sofort-Probe mit 219,0 N/cm², den Maximalwert weist die 1 Std-Probe auf, die 2 Mal begast wurde mit 348,6 N/cm².

Mit längerer Aushärtungszeit (4 und 24 Std) ist die Verformung ohne Festigkeitsabnahme auf 0,2-0,3 mm zurückgegangen. Die Aushärtung mit doppelter Begasung bringt einen deutlichen Anstieg die Festigkeit bei unveränderter Verformung.

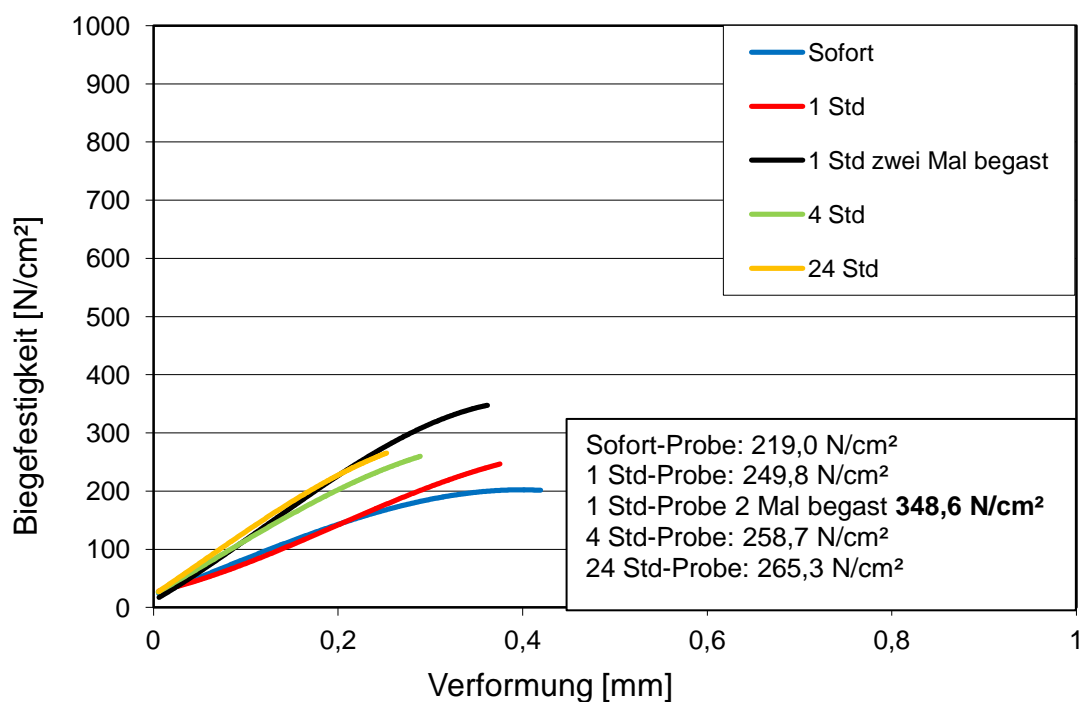


Abbildung 4-26: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Regenerat-Mischung.

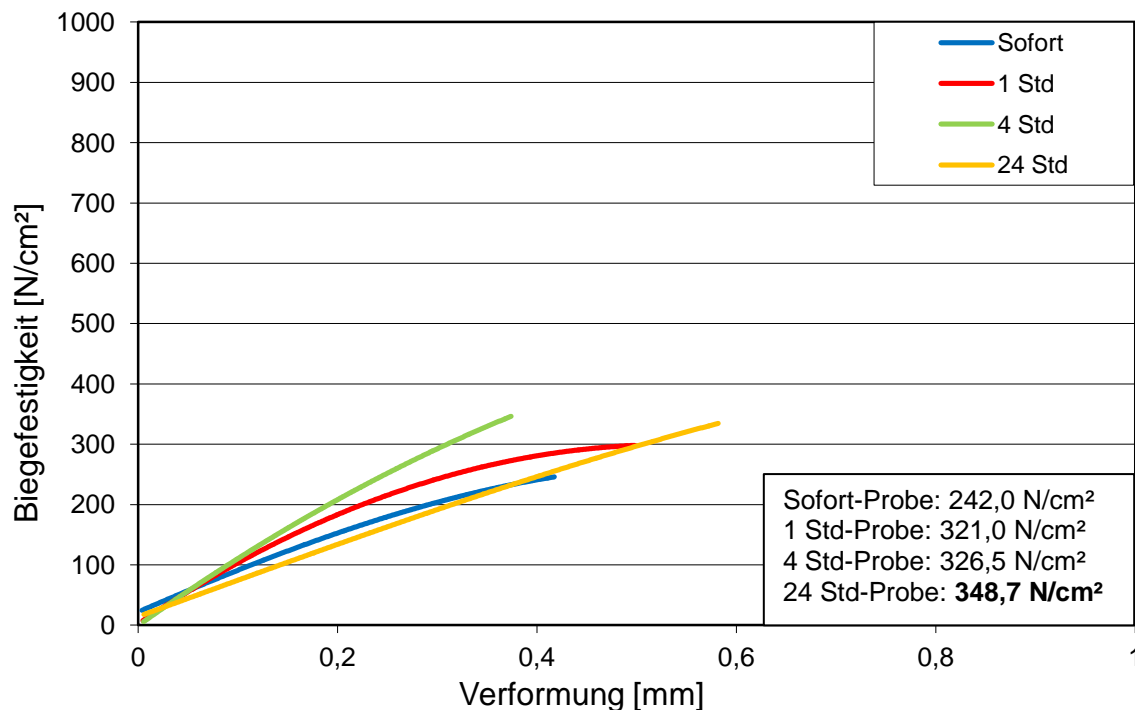


Abbildung 4-27: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Regenerat + Zirkonsand-Mischung.

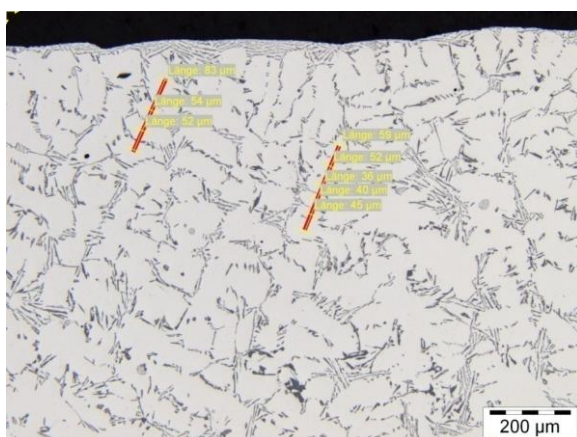
In Abbildung 4-27 sind die Ergebnisse der Versuche mit einer **Metallgranulat-Regenerat-Mischung mit Zirkonsandbeimengung** dargestellt. Die kleinste Biegefestigkeit hat die Sofort-Probe mit 242,0 N/cm², den Maximalwert weist die 24 Std-Probe mit 348,7 N/cm² auf.

Die Verformung ist im Vergleich zu 4 und 24 Stunden Aushärtung etwas höher. Allerdings steigt auch die Biegefestigkeit geringfügig. Da das Regenerieren des Metallgranulats nur einen geringfügigen Aufwand darstellt und die Festigkeitseigenschaften mit denen anderer Sande vergleichbar sind, stellt es eine gute Möglichkeit dar, Materialkosten zu sparen.

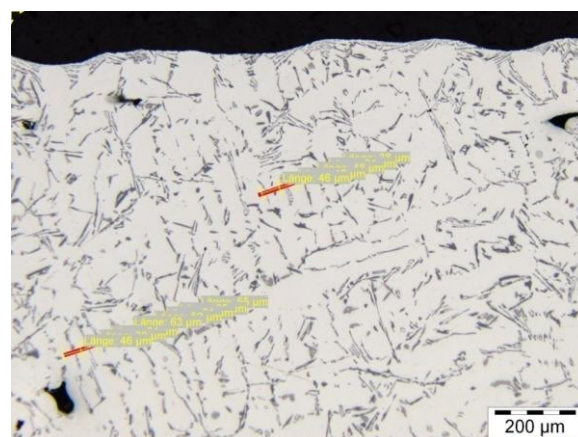
4.8 Abgüsse von Aluminiumlegierung - mit klassischen Quarzsand-Kernen und alternativen Metallgranulat-Kernen

Zur Bestimmung der Gefügeeigenschaften der Gussteile aus der Al Si7Mg Legierung wurden die Dendritenarmabstände am Rand und genau in der Mitte der Proben gemessen (Abb. 4-28). Untersucht wurde an 25 mm und 30 mm Proben, die jeweils gegen Quarzsand- und Metallgranulat-Kerne gegossen wurden. In der verwendeten Legierung haben sich sehr wenige Dendriten mit mehreren Armen ausgebildet, was die Messung erschwert hat. In Tabelle 4-5 und Abbildung 4-29 sind die Mittelwerte der gemessenen Abstände dargestellt.

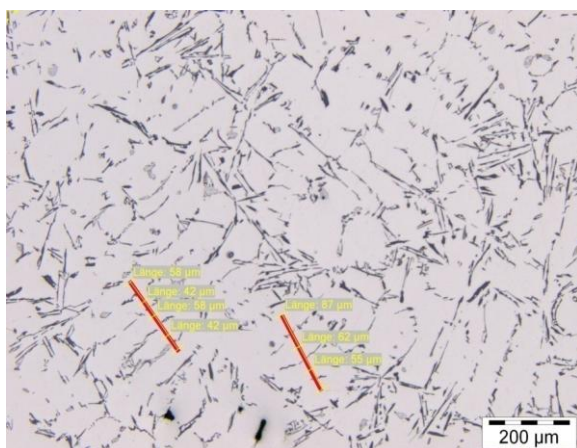
a) Sand-Kern



c) Metallgranulat-Kern



b)



d)

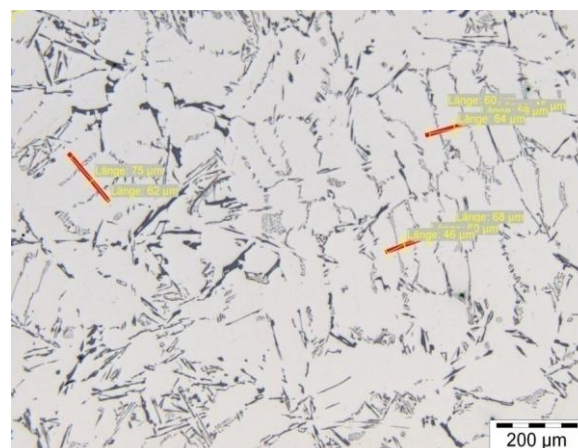


Abbildung 4-28: a) Sand-Kern – Gefüge am Rand, b) Sand-Kern – Gefüge in der Mitte, c) Metallgranulat-Kern – Gefüge am Rand, d) Metallgranulat-Kern – Gefüge in der Mitte.

Die Ergebnisse zeigen eine starke Abschreckwirkung bei der Verwendung von Metallgranulat-Kernen (kurze Erstarrungszeit). Hier gibt es einen signifikanten Abfall der DAS am Rand der Proben, verglichen mit der Mitte. Dies beeinflusst die mechanischen Eigenschaften positiv, da unter anderem die Gefahr der Rissbildung reduziert wird. Bei den Ergebnissen in der Mitte der Proben fällt nur der 30 mm Metallgranulat-Kern, mit Abständen um 59 μm , auf (siehe Abb.4-29). Eine Erklärung für diesen hohen Wert konnte nicht gefunden werden. Dazu wären weitere Messungen notwendig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden.

Die anderen Werte liegen alle nahe bei 50 μm . Interessant ist der leichte Abfall der DAS gegen die Mitte bei den Quarzsand-Kernen.

Tabelle 4-5: Ergebnisse Dendritenarmabstand-Messung.

Kern	Bügelproben- größe	Rand	Mitte
	[mm]	[μm]	[μm]
Metallgranulat	30	42,2	58,9
Metallgranulat	25	43,5	49,8
Quarzsand	30	55,5	51,4
Quarzsand	25	51,8	48,8

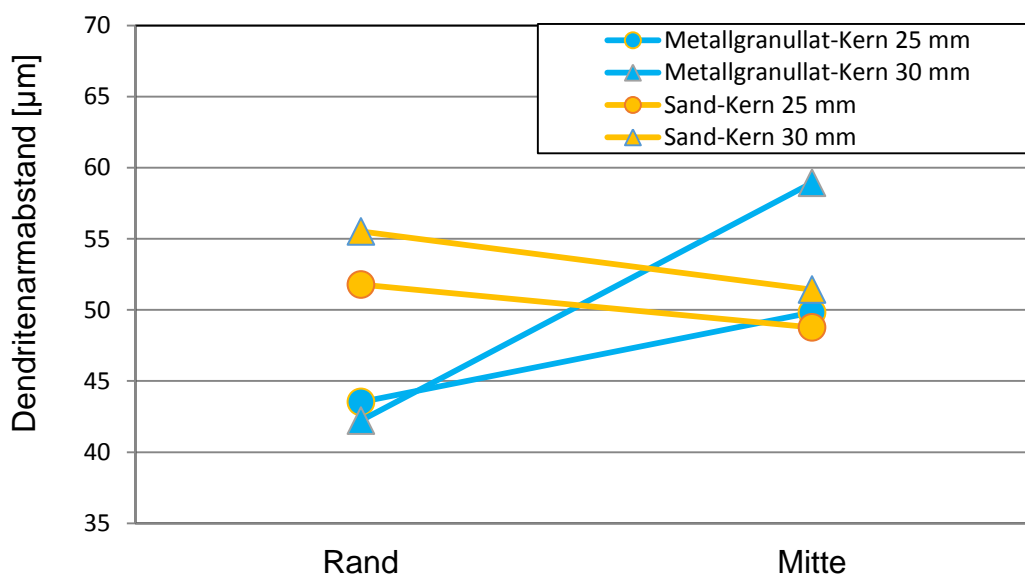


Abbildung 4-29: Metallgranulat-Kern mit Schreckwirkung bringt DAS-Verfeinerung am Rand.

4.9 Abgüsse von Gusseisen mit kugeligem Graphit - mit klassischen Quarzsand-Kernen und alternativen Metallgranulat-Kernen

Die Gießversuche wurden mit Gusseisen GJS-450 (mit Kugelgraphit) am Metallgranulat-Kern und Sand-Kern durchgeführt und danach Gefüge- und Härteunterschiede analysiert. Deutlich zu erkennen ist der Einfluss auf das Randgefüge der Proben in metallographischen Schliffen (vgl. Abb. 4-30 und 4-31).

Es lassen sich 2 Zonen unterscheiden:

1. Zone angeschweisster-Granulatkerne (Von Metallgranulat): Die Granulatkugeln des Kernes schweißen an und legieren das Gussstück während des Gießvorgangs. Es kommt zu einem Eintrag hauptsächlich von Chrom und weniger von Nickel. Durch das zusätzliche Chrom kommt es zu einer Erhöhung der Weißeinstrahlung.
2. Zone kohlenstoffarmer und eisenreicher Bereich: dieser teilt sich in 2 Gebiete: einen oberen (kernnahen) Bereich, der durch streifigen Zementit gekennzeichnet ist und einen unteren Bereich mit meliertem Gusseisen.

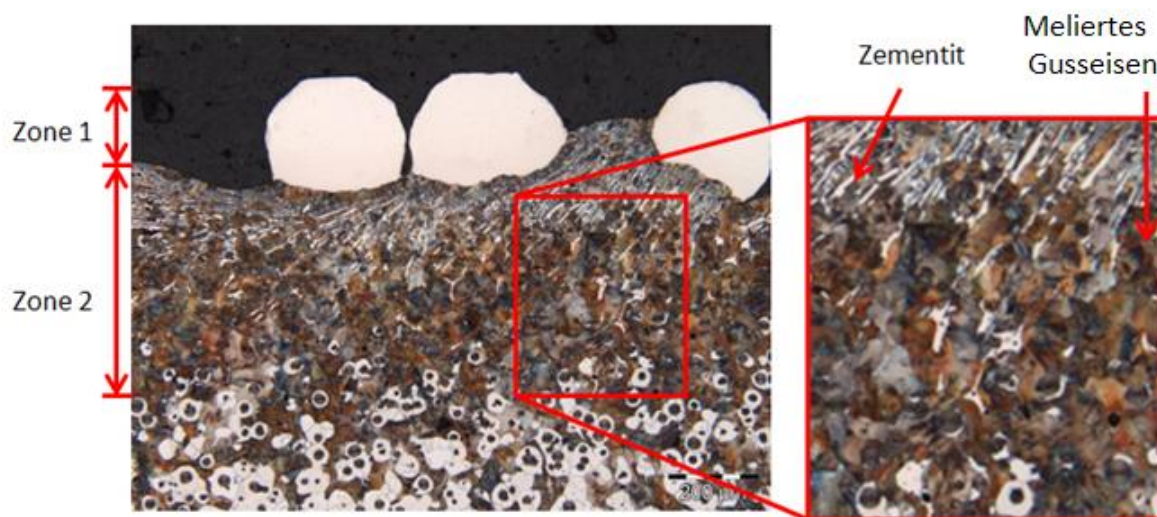


Abbildung 4-30: Probe gegen Metallgranulat-Kern gegossen, hohe Schreckwirkung.

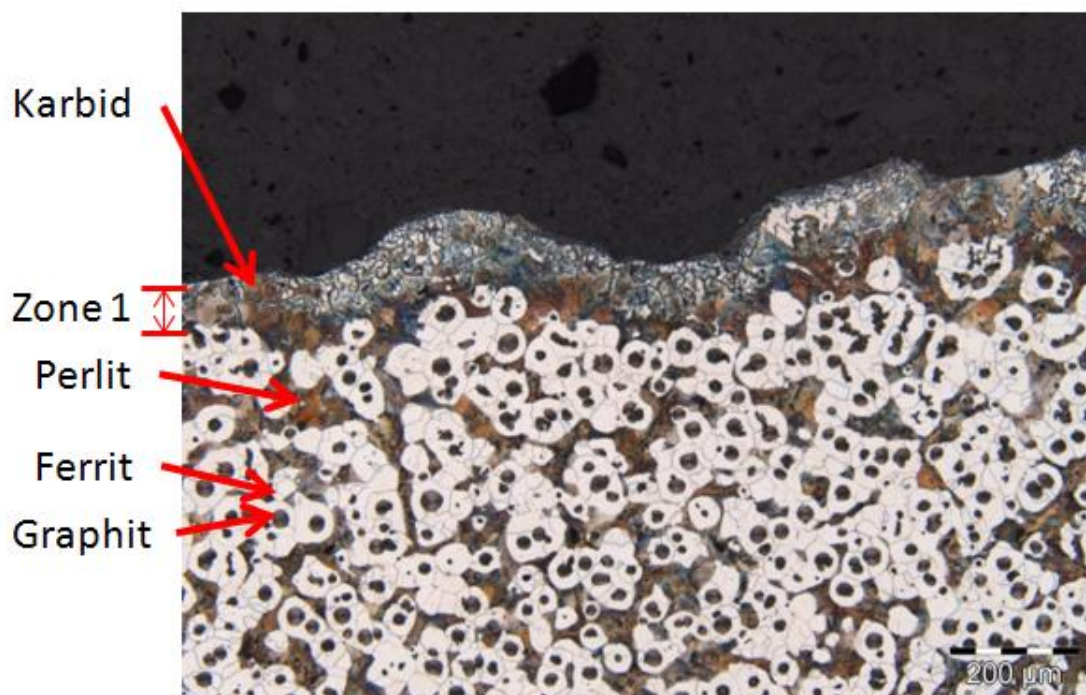


Abbildung 4-31: Probe gegen Sand-Kern gegossen, mit vernachlässigbarer Schreckwirkung.

Abbildung 4-31 zeigt die Mikrostruktur einer gegen einen Sand-Kern gegossenen Probe. Hier fand keine Auflegung statt, jedoch hat sich außen eine dünne Karbidschicht (Zone 1) ausgebildet, teilweise aufgrund der Schreckwirkung des Sandes, die jedoch wesentlich geringer ist als die eines Metallgranulats. Diese geht abrupt in eine Zone kugeligen Graphits über.

4.10 Härteverlauf von Gusseisenproben mit klassischen und alternativen Kernen

Auch in der Materialhärte kommt es zu Unterschieden, die durch die Wahl des Kerns bedingt sind. Die Abbildungen 4-32 und 4-33 zeigen die Härteverläufe vom Rand (Oberfläche) der Probe (0 mm) nach innen.

Bei den gegen einen Metallgranulat-Kern gegossenen Proben kommt es zu einem Härteanstieg durch die in Kap. 4.9 erwähnte Karbidbildung. Die 30 mm Bügel-Probe weist ganz am Rand eine maximale Härte bis 450 HV 0,3 und 1,7 mm von Rand eine Härte von 200 HV 0,3 auf. Die Werte der 25 mm Bügel-Proben fallen etwas niedriger aus, am Rand 380 HV 0,3 und 1,7 mm von Rand 170 HV 0,3.

Der Sand-Kern hat keinen Einfluss auf die Härte am Rand und in der Mitte. 30 mm und 25 mm-Bügel-Probe zeigen am Rand 150 HV 0,3 und 1,7 mm von Rand ca. 170 HV 0,3, wobei diese Werte etwas streuen (100 HV 0,3).

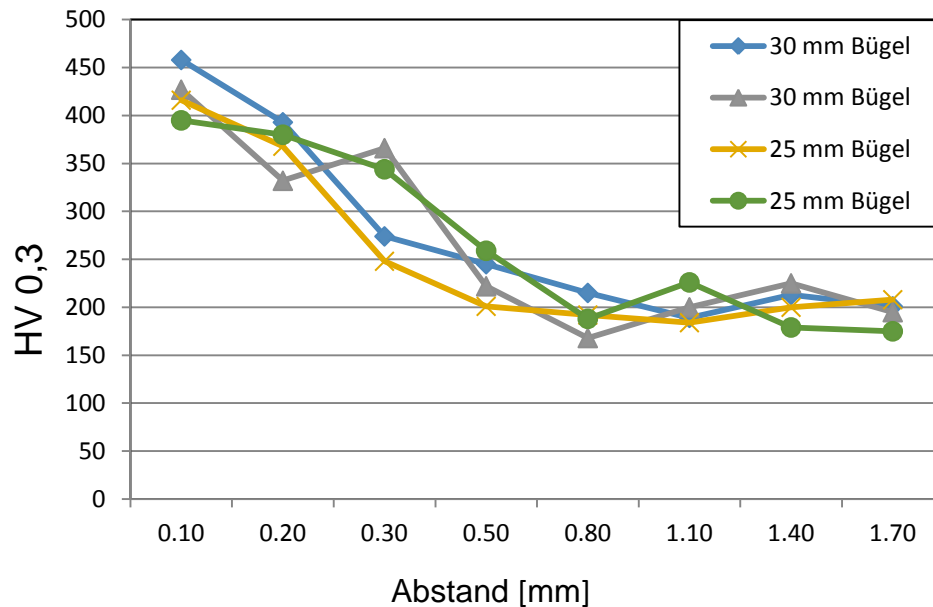


Abbildung 4-32: GJS-450 gegen Metallgranulat-Kern gegossen; 0 mm entspricht der Oberfläche der Probe.

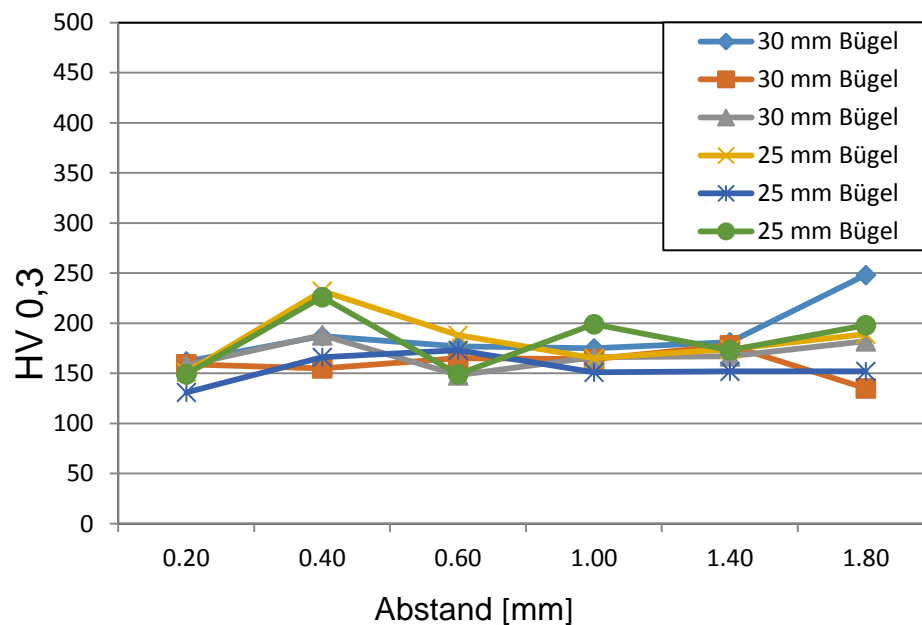


Abbildung 4-33: GJS-450 gegen Sand-Kern gegossen; 0 mm entspricht der Oberfläche der Probe.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Biegefestigkeit

In dieser Arbeit wurden systematisch Alternativen zu Quarzsand in Metallguss untersucht. Zu diesem Zweck wurden Kerne aus dem Formgrundstoff Chromitsand, Zirkonsand, Bauxitsand oder Metallgranulat oder verschiedenartigen Mineralsand-Metallgranulat-Mischungen unterschiedlichen Tests unterzogen. Eine Übersicht über alle Mischungen ist in Tabelle 3-2 und 3-3 abgebildet.

Die mechanische Belastbarkeit der Kerne und ihre Einwirkung auf die Mikrostruktur der Gussteile wurde untersucht. Eine genauere Übersicht über die durchgeführten Tests und Versuche ist in Tabelle 3-1 aufgeführt.

Die Abbildungen 5-1 und 5-2 sind representative Ergebnisse der Testreihe "Biegefestigkeit". Abbildung 5-1 zeigt die Biegefestigkeitswerte der Kerne nach einer Aushärtezeit (Cold-Box) von einer Stunde nach dem Schießen, Abbildung 5-2 nach einer Härtezeit von 24 Stunden (Ausnahme Bauxitsandmischung, der sofort nach dem Schießen und nach 48 Stunden Aushärtezeit getestet wurde). Die Zahlen in den Säulen geben die Verformung während der Prüfung an. Am geringsten ist die Verformung beim Metallgranulat und beim Zirkonsand. Die anderen Mischungen sind nahezu einheitlich bei einer Verformung von 0,4 mm. Beim Chromitsand nimmt sie dagegen leicht ab. Alle anderen verhalten sich nahezu unverändert.

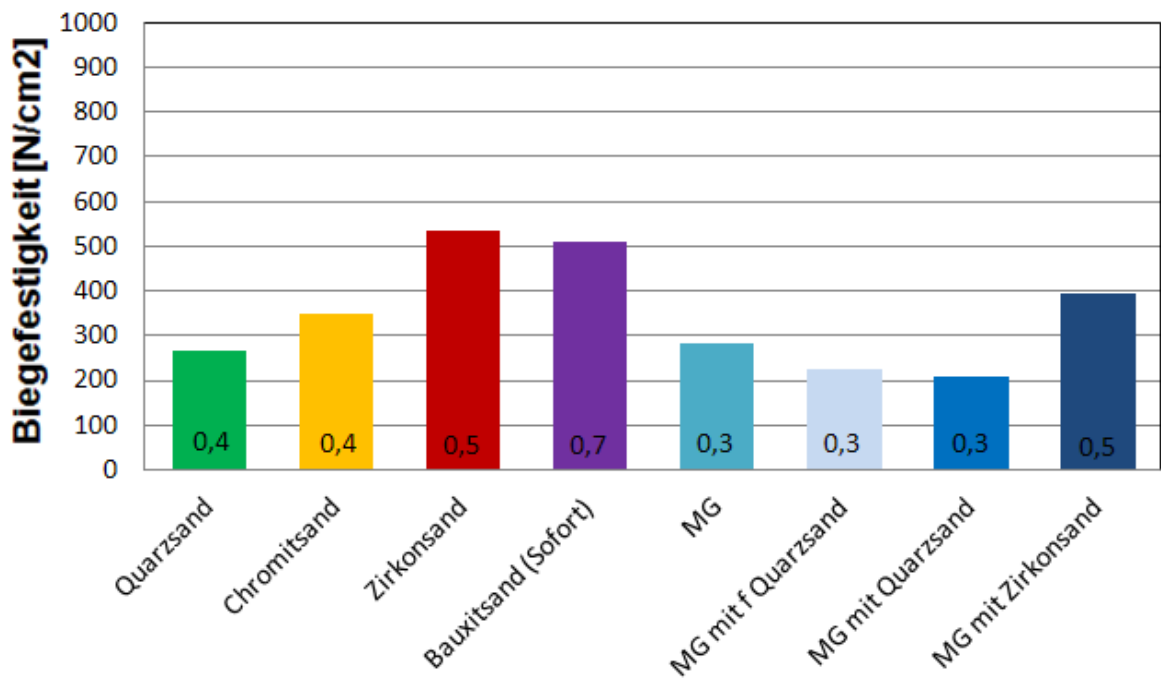


Abbildung 5-1: Übersicht der Ergebnisse der Biegeprüfung für alle Mischungen nach 1 Std Aushärtung.

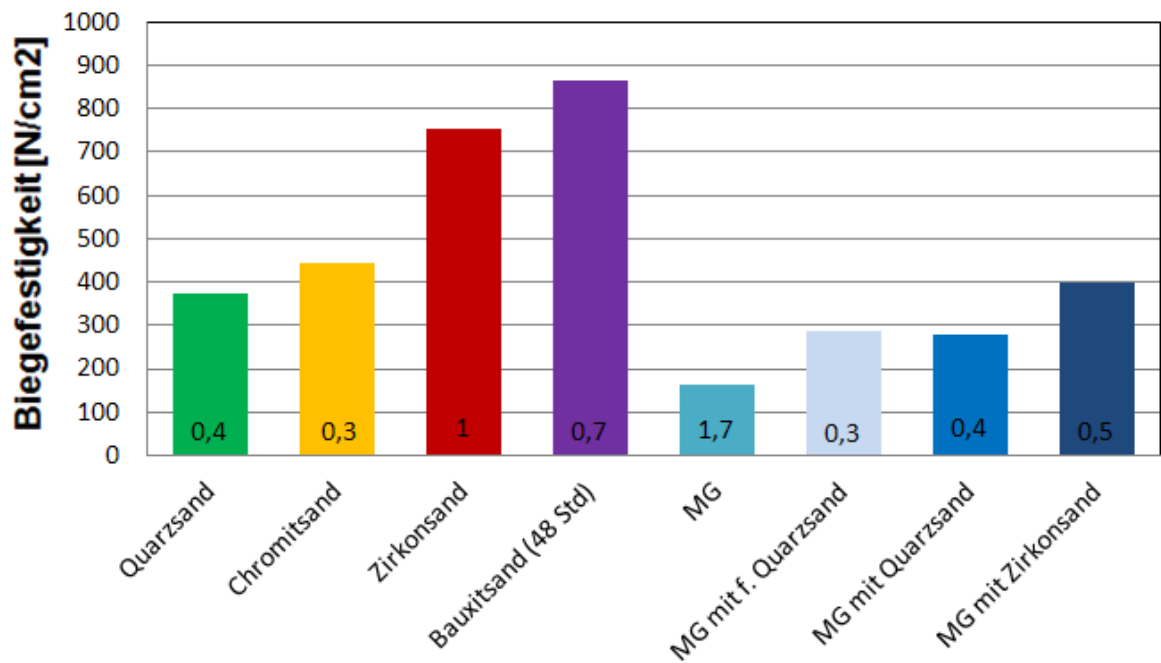


Abbildung 5-2: Übersicht der Ergebnisse der Biegeprüfung für alle Mischungen nach 24 Std Aushärtung.

Die mineralischen Formgrundstoffe zeigen die höchsten Festigkeitswerte aller getesteten Mischungen, während die Mischungen auf Metallgranulat-Basis zwar recht konstante Werte aufweisen, aber doch merklich weniger belastbar sind (vergl. Abb. 5-3). Ein Grund dafür könnte sein, dass die Mischungen auf Metallgranulat-Basis nicht geschossen wurden, sondern per Hand in die Formen gestampft wurden (Kap. 3.1.2). Bei einer Optimierung des Kernschießens für Metallgranulate ist möglicherweise eine Verbesserung der Verdichtung und damit der mechanischen Eigenschaften zu erwarten. Trotzdem liegen die Werte der handgestampfte Kerne noch im Bereich des klassischen Quarzsandes. Wenn keine Spitzenwerte bei der Kernfestigkeit gefordert sind, stellen sie daher eine Alternative zum Quarzsand dar.

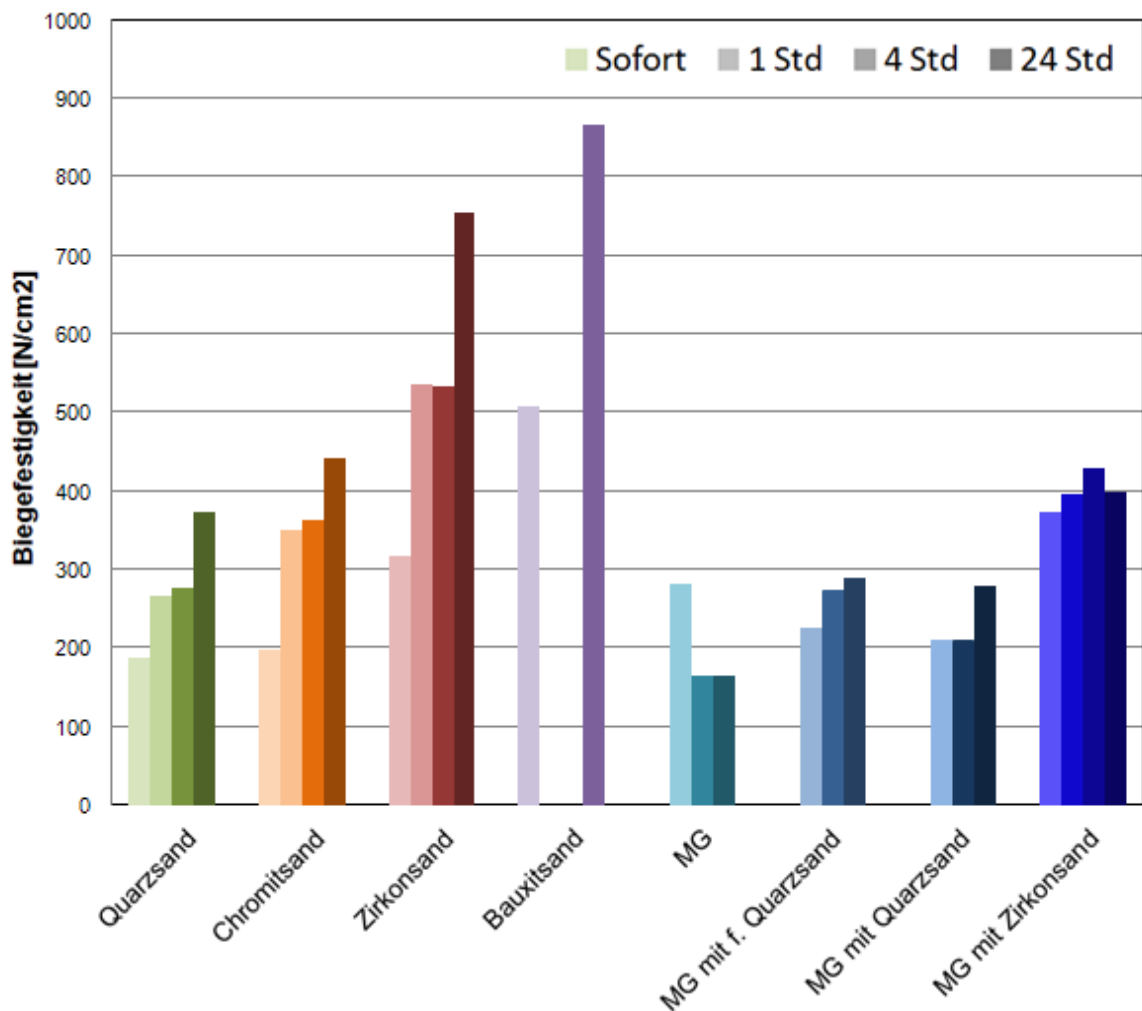


Abbildung 5-3: Übersicht der Ergebnisse der Biegeprüfung für alle Mischungen sofort, nach 1, 4 und 24 Std Aushärtung.

Gesamt über alle Aushärtezeiten betrachtet, erreicht der Bauxitsand die höchsten Festigkeitswerte. Dies liegt an der Korngrößenverteilung der Sandmischung (vergl. Abb. 4-1), die ein Kugelhaufwerk und damit eine erhöhte Binderbrücken Anzahl ermöglichen. Die erreichte Endfestigkeit hängt stark von der Anzahl der Bindungsbrücken pro Volumen ab. Diese steigt mit der Packungsdichte, bzw. mit sinkenden freien Volumen. Abbildung 5-4 zeigt den Zusammenhang von freiem Volumen zum Mischungsverhältnis zweier unterschiedlicher Komponenten (Korngröße). Es lässt sich also erkennen dass das freie Volumen sehr niedrige Werte bei einer 50:50 Mischung aufweist.

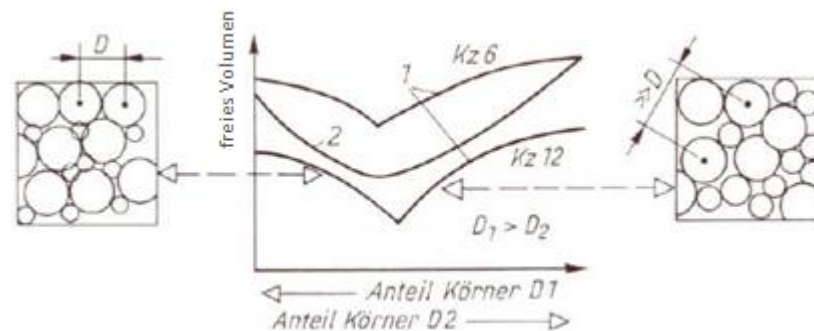


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung zum Einfluss unterschiedlicher Korngrößenanteil auf die Porosität und Formstoffeigenschaften. 1 Kugelhaufwerk; 2 Kornhaufwerk [30].

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Packungsdichte ist die Kornform. Die virtuelle Packungsdichte stellt die theoretisch maximal mögliche Packungsdichte dar. Graubner et al. [31] zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen Kornform (Sphärizität) und der Packungsdichte. Die Sphärizität ist das Verhältnis von Kornumfang zu Kornfläche (jeweils der Projektionen) [31]. Sie konnten zeigen dass die Packungsdichte abnimmt, wenn die Sphärizität zunimmt. In anderen Worten: je schlechter gerundet die Körner sind, desto höher ist die Packungsdichte.

Ein Beispiel für diesen Effekt ist die Mischung mit Zirkonsand. Sie weist die zweitbesten Festigkeitswerte auf, obwohl ihre Korngrößenverteilung einheitlich ist. Wie in Abb. 4-5 ersichtlich ist, weist sie jedoch eine längliche Kornform auf, was die Packungsdichte entsprechend erhöht.

Von den Mischungen mit Metallgranulat sei die mit 10% Zirkonsand hervorgehoben. Durch die Beimischung kleinerer Sandkörner mit länglicher Form

steigt die Festigkeit der Mischung significant an. Nach Abb. 5-4 könnten mit Erhöhung des Zirkonsandanteils noch bessere Festigkeitswerte erzielt werden.

Für mechanisch stark beanspruchte Kerne sind Bauxitsand und Zirkonsand also mögliche Alternativen. Welcher Sand zuletzt gewählt wird, hängt aber auch von dessen Guseigenschaften wie Gasdurchlässigkeit oder Wärmeleitfähigkeit ab. Nicht zuletzt spielt natürlich auch der Preis eine Rolle bei der Entscheidungsfindung.

Der Chromitsand liegt bei der Biegefestigkeit im Bereich des Quarzsandes.

5.2 Einfluss von Abkühlbedingung von Kernen auf das Aluminiumgussgefüge

Bei der Messung der Dendritenarmabstände (DAS) bei den Al Si7Mg Gussteilen fällt die Abschreckwirkung der Metallgranulat-Kerne sofort ins Auge.

Der DAS lässt sich mit folgenden empirischen Formeln beschreiben [37]:

$$DAS = C_{Er} \cdot t_f^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Wobei C_{Er} eine legierungsabhängige Konstante ist und die Erstarrungszeit t_f selbst vom Gießmodul M und dem angewendeten Verfahren (MG/Sand) folgendermaßen abhängt:

$$t_{f(Sand)} = C_{Sand} \cdot M^2 \quad (7)$$

$$t_{f(MG)} = C_{\ddot{u}} \cdot M \quad (8)$$

M - Gießmodul

C_{Er} – Erstarrungskonstante

C_{Sand} – Erstarrungskonstante der Wärmeleitung für den Sand-Kern

$t_{fMet.gr}$ - Erstarrungskonstante am Metallgranulat-Kern

$C_{\ddot{u}}$ – Wärmeübergangskonstante an der Formgrenzfläche

t_f – Erstarrungszeit

Die Erstarrungszeit t_f ist abhängig von den thermophysikalischen Eigenschaften des Sandes, bzw. der Legierung sowie dem Quadrat des Gießmoduls. Im Gegensatz dazu, ist für metallische Formen, die von der Grenzschicht zwischen metallischer Form und Gussteil kontrolliert werden, die t_f proportional zu M . Durch Einsetzen der Gleichung 7 und 8 in Gleichung 6 kann der DAS über den Gießmodul ausgedrückt werden als:

Sand-Kern:

$$DAS (Sand) = C_f \cdot (C_{Sand} \cdot M^2)^{\frac{1}{3}} = C_f \cdot C_{Sand}^{\frac{1}{3}} \cdot M^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

Metallgranulat-Kern:

$$DAS (MG) = C_{Er} \cdot (C_{\ddot{u}} \cdot M)^{\frac{1}{3}} = C_{Er} \cdot C_{\ddot{u}}^{\frac{1}{3}} \cdot M^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Es ist zu erkennen, dass der DAS für Sand und Metallgranulat, stark abhängig von M ist. Wobei für gleiche M ein geringerer DAS für MG zu erwarten ist, da die Modulabhängigkeit $M^{\frac{1}{3}}$ ist, in Gegensatz zum Sand von $M^{\frac{2}{3}}$. Für den spezifischen Versuchsaufbau hier gilt für den Modul M :

$$M = \frac{\text{Volumen}}{\text{Oberfläche}} = \frac{a^2}{4 \cdot a} \quad (11)$$

$$a_{kl} = 25$$

$$M_{25} = \frac{25^2}{4 \cdot 25} = 6,25$$

$$a_{gr} = 30$$

$$M_{30} = \frac{30^2}{4 \cdot 30} = 7,5$$

Damit ergibt sich für das Verhältnis der DAS in der Mitte der Proben für die t_f (M)

gilt, für **MG**:
$$\frac{\lambda_{25}}{\lambda_{30}} = \frac{M_{25}^{\frac{1}{3}}}{M_{30}^{\frac{1}{3}}}$$

Das Verhältnis der gemessenen DAS aus Tab. 4-5 ergibt $\frac{49,8}{58,9} = 0,84$.

Der theoretische Wert errechnet sich nach Gl. 11 $\sqrt[3]{\frac{6,25}{7,5}} = 0,94$.

Der Vergleich gemessen/berechnet zeigt:

$$0,84 = \frac{49,8}{58,9} = \frac{\lambda_{25}}{\lambda_{30}} < \frac{M_{25}^{\frac{1}{3}}}{M_{30}^{\frac{1}{3}}} = 0,94$$

Für Sand **Sand** gilt $\frac{\lambda_{25}}{\lambda_{30}} = \frac{M_{25}^{\frac{2}{3}}}{M_{30}^{\frac{2}{3}}}$ mit den gemessenen λ wird berechnet M ergibt

sich:
$$0,95 = \frac{48,8}{51,4} = \frac{\lambda_{25}}{\lambda_{30}} > \frac{M_{25}^{\frac{2}{3}}}{M_{30}^{\frac{2}{3}}} = 0,89$$

der formale Wert ergibt nach $\sqrt[3]{\frac{6,25^2}{7,5^2}} = 0,89$

Diese Zahlen spiegeln die Aussage der graphischen Darstellung der DAS-Verläufe in Abb. 4-29 wider, die mit den üblicherweise erwarteten Ergebnissen nicht konform sind. Eine Erklärung für diese schlechte Übereinstimmung der theoretischen Modulverhältnisse zu den beobachteten Verhältnissen $\frac{\lambda_{25}}{\lambda_{30}}$ der DAS ist das begrenzte Wärmeschluckvermögen des sich erwärmenden Metall-Kerns, sowie der Einfluss des dem MG gegenüberliegenden Sandformstoffs ($t_f \propto M^2$).

Das Messen der DAS bei der verwendeten Al Si7Mg-Legierung war etwas diffizil, da die Gefügestrukturen optisch schwer erkennbar waren. In dieser Hinsicht wäre die Verwendung einer Al 4Cu-Legierung von Vorteil.

Um den Einfluss des G auf die Messergebnisse der verschiedenen Proben besser vergleichen zu können, wurden die Verhältnisse der DAS von Rand zu Mitte gebildet.

Kleine Probe:

$$\text{Sand } \frac{DAS\ 25\ \text{Rand}}{DAS\ 25\ \text{Mitte}} = \frac{51,8}{48,8} = 1,06$$

$$\text{MG } \frac{DAS\ 25\ \text{Rand}}{DAS\ 25\ \text{Mitte}} = \frac{43,5}{49,8} = 0,8$$

Große Probe:

$$\text{Sand } \frac{DAS\ 30\ \text{Rand}}{DAS\ 30\ \text{Mitte}} = \frac{55,5}{51,4} = 1,07$$

$$\text{MG } \frac{DAS\ 30\ \text{Rand}}{DAS\ 30\ \text{Mitte}} = \frac{42,2}{58,9} = 0,71$$

Vergleicht man die DAS (Sand zu Metallgranulat) fällt auf, dass das Metallgranulat ähnlich einer Kühlkille auf das Gussstück wirkt. Die DAS am Rand der Metallgranulatproben fallen im Gegensatz zu den DAS der Sandproben stark ab, während sie in der Mitte nahezu konstant bleiben. Auffällig ist das Verhältnis der Sandproben, das in beiden Fällen > 1 ist (vgl. Kap. 4.8). Das Verhältnis der 25 mm Proben ist größer als jenes der 30 mm Proben. Dies ist direkt auf die Probengröße zurückzuführen, da der Gradient G direkt vom Weg abhängt: $G = \frac{dT_q}{dz}$. Ist der Weg dz größer, steigt die Abkühlzeit und mit ihr die Dendritenarmabstände λ_1 .

5.3 Einfluss von Abkühlbedingung von Kernen auf das Gusseisengefüge

Weitere Erkenntnisse brachten die Gießversuche mit Gusseisen. Es wurden Gusseisenbügel gegen Metallgranulat- und gegen Sand-Kerne gegossen. Hier waren vorrangig Effekte auf Grund unterschiedlicher Abkühlraten zu beobachten. Bei Proben die gegen Metallgranulat-Kerne gegossen wurden, ist die Abkühlrate, vor allem am Rand der Gussteile, sehr hoch, während sie an Sand-Kernen deutlich niedriger liegt. Dadurch kam es zu unterschiedlichen Abkühlverhalten, die Gussstücke mit unterschiedlichen Eigenschaften hervorbrachten (Abb. 5-5).

Durch die hohe Abschreckwirkung bei den „Metallgranulat“- Proben bildete sich an deren Rand eine 0,2 mm dicke Schicht mit verstärkter Karbideinstrahlung aus (Abb. 5-5). Diese Schicht weist eine HV 0,3 Härte von 400 bis 450 (je nach Bügeldicke)

auf. An der Diffusionsdistanz (X_d) des Kohlenstoffs lässt sich ebenfalls erkennen dass die Abkühlrate mit dem Abstand zum Probenrand abnimmt (Abb. 5-6). Die Ferritsäume der Graphitkugeln, deren Breite der Diffusionsdistanz entspricht, wachsen von praktisch Null auf zehn bis fünfzehn μm an. Bei den Proben die gegen Sand-Kerne gegossen wurden, ist dieser Distanzeffekt nicht vorhanden, die Abkühlrate ist allgemein niedriger und der Ferritsaum hat eine Dicke von etwa 40 μm .

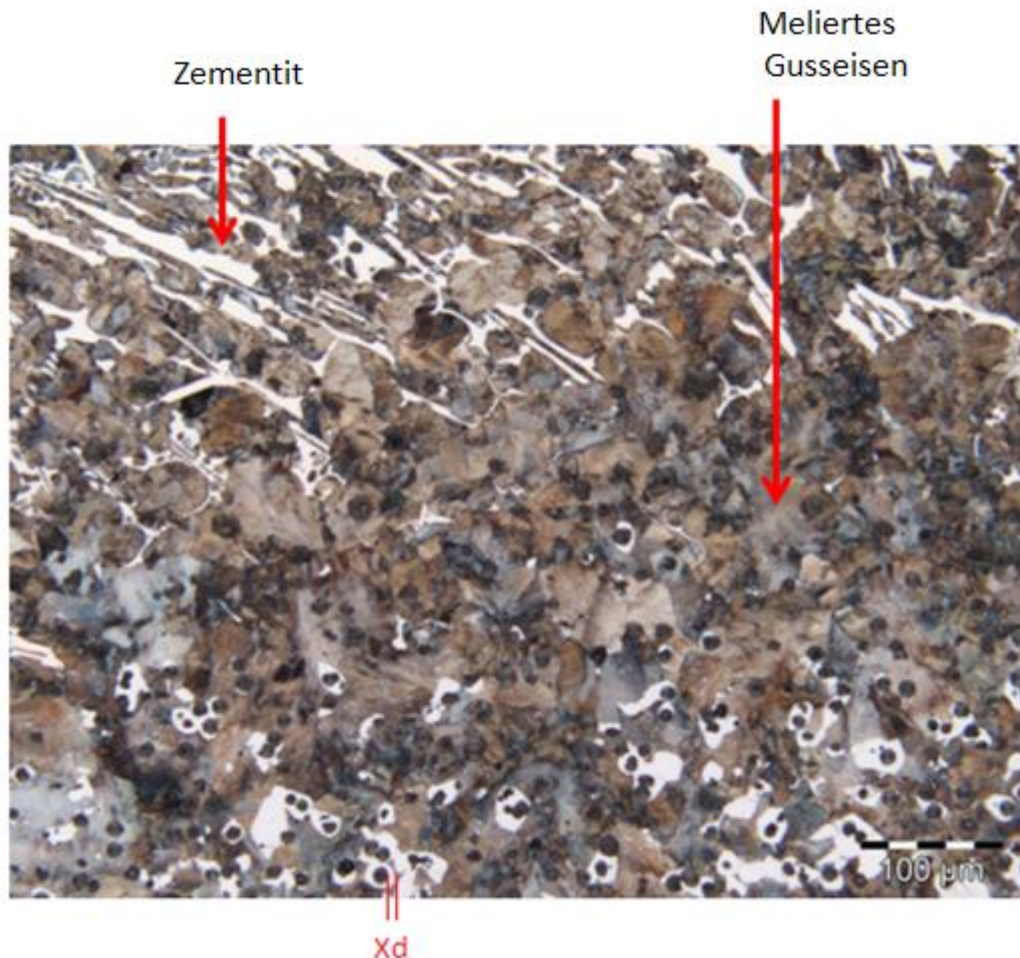


Abbildung 5-5: Gefüge von Gusseisen Wirkung von Metallgranulat-Kern.

Das Problem der erhöhten Weißeinstrahlung ist sicherlich auch auf einen Legierungseffekt mit dem Metallgranulat zurückzuführen. Das verwendete Metallgranulat ist ein nichtrostende G3 14.301 Stahl mit der Zusammensetzung 13Cr2Ni. Der darin enthaltene Chrom hat eine Auflegung bewirkt und damit die Karbidbildung bevorzugt.

Bemerkenswert ist die zuvor erwähnte harte Randschicht der Proben, die gegen das Metallgranulat gegossen wurden. Sie liegt mit 400 – 450 HV 0,3 knapp bei der Hälfte eines Stahls mit Martensitgefüge, der bei 1000 HV 0,3 liegt. Wünscht man ein Produkt mit harter Oberfläche, kann eine Produktion mit Metallgranulat-Formgrundstoffen nach ähnlichem Prinzip in Erwägung gezogen werden. So kann zum Beispiel das Material des Metallgranulats verändert werden. Bei GJS-Granulat würde es zum Beispiel zu keinerlei Auflegierungserscheinungen kommen. Weiters wäre NiSi-Stahlgranulat, sofern verfügbar, eine interessante Alternative. Hier würde es wahrscheinlich zu einem Auflegieren Richtung Graphit kommen und eine chromlegierte Zone zu vermeiden. Unter Anpassung der Rahmenbedingungen kann vielleicht ein ähnliches Produkt wie CrMo4 Stahl an der Oberfläche erreicht werden, ohne dass eine Wärmebehandlung notwendig ist. Ein weitere Aspekt wäre die Wirkung von Schichten wie sie in konventionellen Kühleisen angewendet werden. Dadurch konnte ein Auflegieren verhindert aber auch die Abkühlwirkung vermindert werden.

Ein Problem könnten mögliche Druckspannungen darstellen. Klarheit kann hier nur ein weiteres Versuchsprogramm bringen, das im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden konnte.

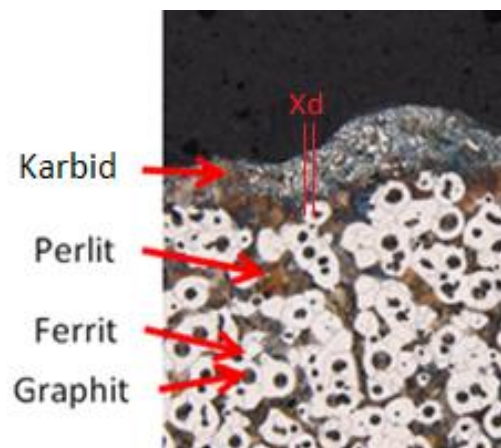


Abbildung 5-6: Gefüge am Rand von Gusseisen Wirkung von Sand-Kern.

6 Zusammenfassung

Als Schlüsselergebnisse dieser Arbeit können die Eigenschaften neuartiger Kerne und deren Wirkung auf das lokale Gefüge folgendermaßen beschrieben werden:

- Bauxitsand und Zirkon erreichen die höchsten Biegefestigkeiten.
- Der Bauxitsand hat durch eine optimal eingestellte Sieblinie eine ideale Packungsdichte.
- Metallgranulate mit Zirkonsand (0,3/0,1) weisen, mit den kleineren Zirkonsandpartikeln in den Zwischenräumen der grösseren MG-Partikel, eine verbesserte Packungsdichte auf. Daraus resultiert auch die höhere Biegefestigkeit als bei Quarzsand und Chromitsand.
- Metallgranulate mit Warm-Box-Härtung (Phenolharzbinder) zeigen eine sehr hohe Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit, durch die hohe metallische Wärmeleitung.
- Bei Al-Legierungen entstehen durch raschen Wärmeentzug (Schreckwirkung) feine Dendriten an der Oberfläche.
- Bei Gusseisen wird durch auflegierten Chrom eine Karbidbildung mit Härteanstieg an der Oberfläche beobachtet.
- Metallgranulate in Kernen oder Formen können für oberflächliche Werkstoffbeeinflussung oder als geformte Kühleisen genutzt werden.

Literatur

- [1] Tilch, W. und Flemming, E.: Formstoffe und Formverfahren. Kapitel 1: Einführung. Die Formherstellung im Prozess der Gußteilmfertigung, S 11-15; Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, Auflage 1. Aufl., ISBN: 3342005319, Leipzig, Stuttgart, Weinheim. 2001;
- [2] Verein Deutscher Gießereifachleute (VDG). Merkblatt R 201: Gießerei Formstoffe, Düsseldorf. Dezember 1976;
- [3] Roller, R. Dobler, H., Pröm, M.: Fachkunde für gießereitechnische Berufe, S. 240-247, 5 Auflage, Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten 2007;
- [4] Tilch, W., Polzin, H.: Entwicklungen bei anorganischen Bindern für die Form- und Kernherstellung. S. 5-20;
- [5] Polzin, H.: Herstellung verloreener Formen und Kerne unter Verwendung von Dauermodellen, erschienen in: Handbuch Urformen. Bühring-Polaczek, A.; Michaeli, W., et al. ISBN 9783446420359. Hanser. München. 2014;
- [6] Verein Deutscher Gießereifachleute (VDG). Taschenbuch 12: Formstoffe und Formverfahren in der Gießereitechnik, Düsseldorf S. 5-50;
- [7] Hoffmann, F. Georg Fischer Aktiengesellschaft Schaffhausen, Technologie der Gießereiformstoffe, S.8;
- [8] Tilch, W. und Flemming, E.: Formstoffe und Formverfahren. Kapitel 3: Grundeigenschaften der Formstoffkomponenten und ihre gießtechnologische Beertung, S 37-104;. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, Auflage 1. Aufl., ISBN: 3342005319, Leipzig, Stuttgart, Weinheim. 2001;
- [9] Wallenhorst, C.: Grundlagen zum Verständniss der anorganischen Kernfertigung. S.184, Gießerei-Praxis, 2010;
- [10] Hasse, S.: Gießerei-Praxis, S.143, Schiele & Schön, ISBN 9783794908141, Berlin, 2011;
- [11] Tilch, W., Polzin, H.: Entwicklungen bei anorganischen Bindern für die Form- und Kernherstellung, S. 155;
- [12] Recknagel, U., Dahlmann, M.: Spezialsande – Formgrundstoffe für die moderne Kern- und Formherstellung. S. 6-17, Düsseldorf;
- [13] Tilch, W., Polzin, H.: Alternativen bei Formgrundstoffen und Bindersystemen Aktuelle Entwicklungen;

-
- [14] unbekant: Bauxitsand. Produktbeschreibung. Termit D.D.O.
- [15] GPT Schäfer GmbH: Ceratec B+C. Alternative Formgrundstoffe zu Quarz-, Chromerz- und Zirkonsand. Grenbroich.
- [16] Schatt, W., Wieters, K.: Pulvermetallurgie. Technologien und Werkstoffe. S. 4-20, 1994;
- [17] Schiel, K. und Müller, R. W.: Die Formsande und Formstoffe, 1953;
- [18] Tilch, W., Polzin, H.: Entwicklungen bei anorganischen Bindern für die Form- und Kernherstellung. S. 9-20;
- [19] Hasse, S.: Gießerei-Praxis, S. 143-186, Schiele & Schön, ISBN 9783794908141, Berlin, 2011;
- [20] Polzin, H.: Anorganische Binder zur Form- und Kernherstellung in der Gießerei, 1. Auflage, Fachverlag Schiene und Schön GmbH, 2012;
- [21] Tilch, W. und Flemming, E.: Formstoffe und Formverfahren. Kapitel 1: Einführung. Die Formherstellung im Prozess der Gußteilmfertigung, S 267-367; Dt. Verl. für Grundstoffindustrie; Wiley-VCH, Auflage 1. Aufl., ISBN: 3342005319, Leipzig, Stuttgart, Weinheim. 2001;
- [22] Sahm, P. R., Egry, I., Volkmann, T.: Schmelze, Erstarrung, Grenzfläche, S. 140-142, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1999;
- [23] Kurz, W., Fischer, D.J., Fundamentals of solidification, Fourth Revised Edition, Trans Tech Publications LTD, S.46-52, Schweiz, 1998;
- [24] Kurz, W. und Fisher, D.J.: Fundamentals of solidifikation. Kapitel 4: Solidification microstructure: cells and dendrites; Trans Tech Publ., S. 63-92. Auflage 4., rev.ed., reprinted., ISBN: 0878498044, Uetikon-Zuerich. 2005;
- [25] Lamm, M.: Einfluss der Erstarrungsbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften von einkristallinen Superlegierungen bei großen Wandstärken. Dissertation. Kapitel 1: Stand der Literatur, S. 3-41. Universität Erlangen, Erlangen, 2007;
- [26] Kurz, W., Fischer, D.J.: Fundamentals of solidification, Fourth Revised Edition, S.87, Trans Tech Publications LTD, Schweiz, 1998;
- [27] Lödding, B., Uphoff, H.: Rasterelektronenmikroskopie – REM, S.1-6, Praktikum-Versuch №5;

- [28] Science meets School – Werkstoffe und Technologien in Freiberg, Härten von Stahl, Technische Universität Bergakademie Freiberg, www.schuelerlabor.tu-freiberg.de, abgerufen am 17.05.2016;
- [30] <http://www.giessereilexikon.com/giessereilexikon/Encyclopedia/show/packungsdichte-678/?cHash=ceb06001a9bab9eea5a79ff7e19ef25f>; abgerufen am 11.09.2016;
- [31] Graubner, C., Proske, T., Ramge, P.: Einfluss der Kornform auf die Packungsdichte von Gesteinskörnungen; Beton, Verlag Bau + Technik, 2006.
- [32] <https://chemie.uni-paderborn.de/arbeitskreise/technische-chemie/cmp/ausstattung/fib/->; abgerufen am 15.09.2016;
- [33] Fischer, S.F.: Erstarrung, erschienen in: Handbuch Urformen. Bührung-Polaczek, A. Michaeli, et al. ISBN 9783446420359. Hanser. München.2014;
- [34] <http://www.advanced-mining.com/artikel.php?id=27>; abgerufen am 15.09.2016;
- [35] Schatt, W., Wieters, K.: Pulvermetallurgie. Technologien und Werkstoffe. S. 5-68, 2007;
- [36] Ratke, L., Sahm, R.: Erstarrung einer technischen Al-Si-Mg Legierung in Silica-Aerogelformen; S. 50-53, 2002;
- [37] Stefanescu, D.: Science and Engineering of casting solidification, Alabama, 2002;

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung Formstoff	- 8 -
Abbildung 2-2: Hot-Box-Verfahrensschema.	- 23 -
Abbildung 2-3: Konstitutionelle Unterkühlung einer Legierung	- 26 -
Abbildung 2-4: Abhängigkeit der Erstarrungsfrontgeschwindigkeit V und der Temperaturradienten G	- 27 -
Abbildung 2-5: Die Änderung der Dicke der Dendritenarme durch Ostwald Reifung nach 20 Minuten	- 27 -
Abbildung 2-6: Abhängigkeit Dendritenarmabstand und Abkühlzeit.	- 28 -
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung zum primären Dendritenachsabstand λ_1	- 29 -
Abbildung 3-1: Rührmischer.	- 32 -
Abbildung 3-2: Kernsandschießmaschine.	- 33 -
Abbildung 3-3: links: Anlage zur Begasung mit Dimethylisopropylamin; rechts: Form mit Heizelement.	- 34 -
Abbildung 3-4: Elektrisch gesteuerte Prüfmaschine mit Biegeprüfvorrichtung.	- 36 -
Abbildung 3-5: Probenkörper.	- 36 -
Abbildung 3-6: Biegefestigkeitsprüfungen.	- 37 -
Abbildung 3-7: Kernform mit Heizelement. Biegeproben aus Metallgranulat mit Kerneisen (Draht).	- 38 -
Abbildung 3-8: Gebrochene Biegeproben aus Metallgranulat.	- 38 -
Abbildung 3-9: Schematische Darstellung einer Bügelproben.	- 39 -
Abbildung 3-10: a) Herstellung einer Gießform; b) untere gefüllte Kasten mit Modellen; c) Kasten mit Modellen und Speisen; d) untere Formkasten mit Sand-Kerne – links und Metallgranulat – rechts.	- 40 -
Abbildung 3-11: geöffnete Form nach dem Gießversuch.	- 41 -
Abbildung 3-12: Fertige Gussteile.	- 41 -
Abbildung 3-13: Geschnittene Gussteil.	- 42 -
Abbildung 3-14: Geschnittene Gussteile, links- Aluminium; rechts – Gusseisen.	- 42 -
Abbildung 3-15: Geschnittene Probe mit Untersuchungsbereichen (gilt für Innenseite der Probe).	- 43 -
Abbildung 3-16: Gefügebildung mit Dendritenarmabstand-Messungen.	- 43 -
Abbildung 3-17: Schematische Darstellung eines Rasterelektronenmikroskops.	- 44 -
Abbildung 3-18: Anregungsbirne REM	- 45 -
Abbildung 4-1: Korngrößenverteilungen (Sieblinien) der Sande und des Metallgranulats (schematisch).	- 48 -

Abbildung 4-2: Überblick über verschiedene Kornformen	- 48 -
Abbildung 4-3: Quarzsand-Mischung. Rasterelektronenmikroskopbilder der Kernsandproben. Rechts: 30X; Links: 100X.	- 49 -
Abbildung 4-4: Chromitsand-Mischung. Rasterelektronenmikroskopbilder der Kernproben. Rechts: 30X; Links: 100X.....	- 49 -
Abbildung 4-5: Zirkonsand-Mischung. Rasterelektronenmikroskopbilder der Kernproben. Rechts: 30X; Links: 100X.	- 50 -
Abbildung 4-6: Bauxitsand-Mischung. Rasterelektronenmikroskopbilder der Kernproben. Rechts: 30X; Links: 100X.	- 50 -
Abbildung 4-7: Metallgranulat und Metallgranulat-Mischungen. a: Foto der Kerne, Rasterelektronenmikroskopbilder b: Metallgranulat 30X, c: Metallgranulat mit 20% Quarzsand, 30X, d: Metallgranulat mit 10% Zirkonsand, 100X.	- 51 -
Abbildung 4-8: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der Sofort-Prüfung.	- 53 -
Abbildung 4-9: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 1 Std-Prüfung.	- 54 -
Abbildung 4-10: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 4 Std-Prüfung.	- 55 -
Abbildung 4-11: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 24 Std-Prüfung.	- 56 -
Abbildung 4-12: Übersicht der gemittelten Ergebnisse der Biegeprüfung mit Quarzsand- Mischung.....	- 57 -
Abbildung 4-13: Übersicht der gemittelten Ergebnisse der Biegeprüfung mit Chromitsand- Mischung.....	- 58 -
Abbildung 4-14: Übersicht der gemittelten Ergebnisse der Biegeprüfung mit Zirkonsand- Mischung.....	- 59 -
Abbildung 4-15: Übersicht der gemittelten Ergebnisse der Biegeprüfung mit Bauxitsand- Mischung.....	- 60 -
Abbildung 4-16: Ergebnisse der Biegeprüfung nach Sofort-Prüfung für Quarzsand-, Chromitsand-, Zirkonsand- Bauxitsandmischungen.....	- 61 -
Abbildung 4-17: Ergebnisse der Biegeprüfung nach 24 (48)-Std-Prüfung für Quarzsand-, Chromitsand-, Zirkonsand- Bauxitsandmischungen.....	- 62 -
Abbildung 4-18: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung (geschossene Kerne).	- 63 -
Abbildung 4-19: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung (gestampft).	- 64 -
Abbildung 4-20: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung mit 20% Quarzsand (Q) Feinanteil (f) $\varnothing < 0,25$ mm und Kerneisen (KE).....	- 65 -
Abbildung 4-21: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung mit 20% Quarzsand und Kerneisen (KE).....	- 66 -

Abbildung 4-22: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung mit 10% Zirkonsand.	- 67 -
Abbildung 4-23: Ergebnisse der Biegeprüfung für Quarzsand-Mischung mit Furanharz (Warm-Box-Härtung).	- 68 -
Abbildung 4-24: Ergebnisse der Biegeprüfung für Quarzsand-Mischung mit Phenolharz (Warm-Box-Härtung).	- 69 -
Abbildung 4-25: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Mischung mit Phenolharz. Aushärtung (Warm-Box) in der Form 2 Min.	- 70 -
Abbildung 4-26: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Regenerat-Mischung.....	- 71 -
Abbildung 4-27: Ergebnisse der Biegeprüfung für Metallgranulat-Regenerat + Zirkonsand-Mischung.....	- 72 -
Abbildung 4-28: a) Sand-Kern – Gefüge am Rand, b) Sand-Kern – Gefüge in der Mitte, c) Metallgranulat-Kern – Gefüge am Rand, d) Metallgranulat-Kern – Gefüge in der Mitte.	- 73 -
Abbildung 4-29: Metallgranulat-Kern mit Schreckwirkung bringt DAS-Verfeinerung am Rand.	- 74 -
Abbildung 4-30: Probe gegen Metallgranulat-Kern gegossen, hohe Schreckwirkung. .	- 75 -
Abbildung 4-31: Probe gegen Sand-Kern gegossen, mit vernachlässigbarer Schreckwirkung.....	- 76 -
Abbildung 4-32: GJS-450 gegen Metallgranulat-Kern gegossen; 0 mm entspricht der Oberfläche der Probe.	- 77 -
Abbildung 4-33: GJS-450 gegen Sand-Kern gegossen; 0 mm entspricht der Oberfläche der Probe.	- 77 -
Abbildung 5-1: Übersicht der Ergebnisse der Biegeprüfung für alle Mischungen nach 1 Std Aushärtung.....	- 79 -
Abbildung 5-2: Übersicht der Ergebnisse der Biegeprüfung für alle Mischungen nach 24 Std Aushärtung.....	- 79 -
Abbildung 5-3: Übersicht der Ergebnisse der Biegeprüfung für alle Mischungen sofort, nach 1, 4 und 24 Std Aushärtung.	- 80 -
Abbildung 5-4: Schematische Darstellung zum Einfluss unterschiedlicher Korngrößenanteil auf die Porosität und Formstoffeigenschaften. 1 Kugelhaufwerk; 2 Kornhaufwerk.....	- 81 -
Abbildung 5-5: Gefüge von Gusseisen Wirkung von Metallgranulat-Kern.....	- 86 -
Abbildung 5-6: Gefüge am Rand von Gusseisen Wirkung von Sand-Kern.....	- 87 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Die wichtigsten Anforderungen und Eigenschaften von Form- und Kernsandem.....	- 10 -
Tabelle 2-2: Alle Formverfahren mit Sandmischungen.....	- 11 -
Tabelle 3-1: Übersicht über die verwendeten Mischungen, Versuche und Analysen. ...	- 31 -
Tabelle 3-2: Zusammensetzungen von Mischungen für Cold-Box-Verfahren.....	- 35 -
Tabelle 3-3: Zusammensetzungen von Mischungen für Warm-Box-Verfahren.	- 36 -
Tabelle 4-1: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der Sofort-Prüfung.	- 52 -
Tabelle 4-2: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 1 Std-Prüfung.	- 54 -
Tabelle 4-3: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 4 Std-Prüfung.	- 55 -
Tabelle 4-4: Quarzsand-Mischung. Ergebnisse der 24 Std-Prüfung.....	- 56 -
Tabelle 4-5: Ergebnisse Dendritenarmabstand-Messung.	- 74 -

Abkürzungsverzeichnis

Abb	Abbildung
c_l	Konzentration der Flüssigphase in der Grenzfläche
c_0	Konzentration der Solidphase weit entfernt zur Erstarrungsfront
Δc_0	Konzentrationsabweichung
DIN	Deutsches Institut für Normung
D	Diffusionskoeffizient der Schmelze
ε	Proportionalitätsfaktor
G	Gradient
Gew%	Gewichts Prozent
GJS	Grauguss mit Kugeligen Graphit
GJL	Grauguss mit Lamellengraphit
HV	Härteprüfung nach Vickers
μm	Mikrometr
MPa	Einheit "Megapascal"
MG	Metallgranulat
M-Zahl	Einheit "Macro Grain Size"
OPS	Oxid Polier Suspension
REM	Rasterelektronenmikroskop
Std	Stunden
SDAS	Dendritenarmabstand
t	Tonne
VGD	Verein deutscher Gießereileute
v	Wachstumsrate
V	Erstarrungsgeschwindigkeit
λ_1	primäre Dendritenarmabstand
KE	Kerneisen
z	Entfernung zu Erstarungsfront
z.B	zum Beispiel