

**INSTITUT FÜR EISENHÜTTENKUNDE UND GIESSEREIWESEN
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT CLAUSTHAL
GIESSEREIKUNDE**

**Erprobung und Optimierung umweltfreundlicher Gießverfahren für
Eisenlegierungen mit metallischen Formstoffen und besonderer Eignung
für mittelständische Gießereien**

Vakuum-Formverfahren mit Stahlsand

Abschlußbericht des Förderprojekts

Gefördert unter dem Az: 04008 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

von

Reinhard Döpp, Wilhelm Gerhard und Christian Land, Clausthal

Clausthal-Zellerfeld

Juli 1997

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	04008	Referat	21	Fördersumme	186.000,00 DM
Antragstitel	Erprobung und Optimierung umweltfreundlicher Giessverfahren für Eisenlegierungen mit metallischen Formstoffen und besonderer Eignung für mittelständische Giessereien				
Stichworte	Vakuum-Formverfahren; Gusseisen; Stahlsand; Quarzsand ; Kokille; Schlichte; Folie; Graphitusbildung, Reststoffvermeidung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
24 Monate	10/94	10/96	keine		
Zwischenberichte	2				
Bewilligungsempfänger	Institut für Eisenhüttenkunde und Giessereiwesen der TU Clausthal - Giessereikunde- Robert-Koch-Str. 42 38678 Clausthal-Zellerfeld			Tel.: 05323-722530 Fax.: 05323-723120 Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. R. Döpp Bearbeiter: Dipl.-Ing. C. Land	
Kooperationspartner	Eisengiesserei Gattermann GmbH & Co. KG, Dassel Man Roland Druckmaschinen AG, Offenbach				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die offensichtlichen Nachteile des Kokillengusses und ton- und kunstharzgebundener Sand-Giessverfahren sollten reduziert werden. Durch Verwendung von Stahlsand statt Quarzsand im Vakuum-Formverfahren ergab sich die Möglichkeit die Nachteile der Verfahren aus umwelttechnischer Sicht zu reduzieren ohne die Vorteile der jeweiligen Verfahren zu vernachlässigen. Dazu mussten aber grundlegende Untersuchungen zur Machbarkeit dieses Verfahren erfolgen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Erste Schritte dieser Untersuchung befassten sich mit der Herstellung einer stabilen Form zum Abguss der Probekörper. Später folgte die Optimierung der Gussstückoberfläche. Die letzten Untersuchungen beschäftigten sich mit den Möglichkeiten der Eigenschaftsveränderung des Gefüges durch Variationen der Zusammensetzung des als Formstoff verwendeten Stahlsandes. Zum Vergleich wurden in Quarzsand abgegossene Gussstücke zusätzlich mit untersucht. Neben chemischen Voranalysen des eingesetzten Roheisens, erfolgte eine Analyse der tatsächlich erreichten chemischen Werte, Sandanalysen, Schichtdickenmessungen der Schlichteschichten, thermische Analyse, und metallographische Untersuchungen mit den dazugehörigen Auswertungen.

Ergebnisse und Diskussion

Durch die Verwendung von Stahlsand in verschiedenen Mischungszusammensetzungen sind vielfältige Einflussnahmen auf die Gefügeausbildung naheutektischer Gusseisenlegierungen möglich. So sind gewünschte Eigenschaften aus dem Kokillenguss (schnelle Erstarrung, feine Graphitlamellen) ebenso zu erzielen, wie Eigenschaften aus dem Sandguss (langsame Abkühlung, Umwandlung des Perlits in Graphit und Ferrit).

Durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Formstoffs Stahlsand entsteht am Rand ein sehr feines, oft auch dendritisch ausgebildetes Gefüge. Eine unerwünschte Weisseinstrahlung ist ohne grossen Aufwand, wie sie zum Beispiel im Kokillengussverfahren durch Vorheizen der Kokille verhindert wird möglich. Bei dem Vakuumverfahren mit Stahlsand kann durch verändern der Korngrösse und Mischung verschiedener Korngrössen des Stahlsandes die Abkühlungsgeschwindigkeit in weiten Bereichen variiert werden.

Die Perlitbildung im Gusseisen ist über die Auswahl der Formstoffmischungen, Schlichtedicke, Modellsanddicke und Verweilzeit zu beeinflussen.

Die Erstarrungsbedingungen mit Stahlsand als Formstoff sind vergleichbar denjenigen in der Kokille. Die spätere Abkühlung erfolgt eher nach den Bedingungen des Quarzsand-Vakuum-Formverfahrens. Die Zeit zwischen Einguss und Ende der eutektoiden Umwandlung kann maximal um etwa 70 % verkürzt werden. Dies ist aber abhängig von den gewählten Stahlsandmischungen.

Organische Stoffe werden im Vakuum-Formverfahren nur durch die Folie, die direkt mit der Schmelze in Kontakt kommt in den Stahlsand eingetragen. Die äussere Folie unterliegt dagegen keinen hohen thermischen oder technologischen Belastung. Hier sind günstige, leicht recyclebare Folien einsetzbar. Für den Formhohlraum werden Vinylacetatfolien benötigt.

Der durch die Folie verunreinigte Modellsand bildet eine Schale um die Gussstücke. Eine Trennung unbelasteten Sandes vom Belasteten ist einfach. Gegenüber herkömmlichen ton- oder kunstharzgebundenen Sanden sind die aufzuarbeitenden Mengen gering. Desweiteren muss nicht wie bei den anderen Verfahren der gesamte Sand gereinigt und aufgearbeitet werden.

Die verwendete Schlichte ist durch den überwiegend keramischen Aufbau weitgehend unbedenklich.

Vorteile des Verfahrens sind reduzierter Energie-, Bearbeitungs- und Materialaufwand gegenüber Dauerformen (Kokillen) und geringere Emissionen, geringerer Energie- und Aufarbeitungsaufwand der Formstoffe ton- oder kunstharzgebundener Verfahren. Stahlsand ist im ungünstigsten Fall leicht dem Recyclingprozess als Kreislaufmaterial hinzuzufügen. Durch die hohen Schmelztemperaturen des Stahlsandes ist eine umweltgerechte Entsorgung organischer Bestandteile möglich. Die Deponierung von Restbestandteilen entfällt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die vorgestellten Ergebnisse werden in verschiedenen Fachzeitschriften und auf Fachvorträgen vorgestellt. Desweiteren wird in Publikationen der TU-Clausthal auf dieses Forschungsvorhaben hingewiesen. Eine kurze Darstellung im Internet ist geplant. Der erste Beitrag über das Vakuumformverfahren mit Stahlsand erfolgte auf dem Giessereikolloquium im Oktober 1996 in Clausthal-Zellerfeld.

Fazit

Die Verwendung von Stahlsand im Vakuum-Formverfahren ist möglich. Die Oberflächengüte wird durch Schichten und spezielle Sandeigenschaften gesichert.

Als weitere Aufgaben zur Optimierung des Verfahrens sind zu nennen:

- Untersuchungen zum Recycling der belasteten Formstoffschale
- Verhalten des Kreislaufsand bei längerer Nutzung
- Verbesserung des schichtweisen Sandaufbaus
- Untersuchung zu Voraussagen über die Abkühlungseigenschaften verschiedener Stahlsandmischungen

Für eine Grossserienfertigung ist das Vakuum-Formverfahren zu Zeit noch zu aufwendig. Für spezielle Anwendungen und besondere Anforderungen an ein Gussteil ist die Einsatz in der Praxis bereits erfolgreich verlaufen. Stahlsand als Formstoff erweitert die Möglichkeiten um Eigenschaften von Gussstücken gezielter einzustellen.

1. Zusammenfassung	4
2. Einleitung.....	5
3. Beschreibung des Vakuum-Formverfahrens	6
4. Versuchsaufbau.....	8
5. Versuchsdurchführung.....	10
5.1. Untersuchung der Formstoffstabilität.....	11
5.2. Untersuchung verschiedener Schichteschichten und Arten der Auf- bringung.....	12
5.3. Untersuchung der Gießtemperatur und der Formstoffschale.....	12
5.4. Untersuchung des Formstoffes und der Formstoffmischung	14
5.5. Untersuchung des Einflusses der Formstoffe auf das Abkühlverhalten der Schmelze	17
5.5.1. Einfluß der Formstoffmischung	17
5.5.2. Einfluß der Verweilzeit	20
5.6. Metallographische Untersuchungen	26
6. Vorteile des Verfahren aus umwelttechnischer Sicht.	30
7. Fazit.....	30
8. Schrifttum.....	31
Anhang	

Bild 1.	Modellplatte auf dem Arbeitstisch der Vakuum-Formanlage. Sichtbar sind die Absaugöffnungen (Düsen) zur Erzeugung des Vakuums	6
Bild 2.	Arbeitsablauf bei der Formherstellung nach dem Vakuum-Formverfahren /3/	7
Bild 3.	Lage und Maße der Gußstücke und Anordnung der Thermoelemente (Nr. 1 bis 10)	8
Bild 4.	„Schlitzrohre“ erhöhen die Absaugmenge der Luft aus dem Formkasten.....	10
Bild 5.	Beim Abguß vertikaler Aufbau der verschiedenen Schichten zwischen Gußstück und Formstoff	10
Bild 6.	In den Formstoff eingedrungene Schmelze.....	11
Bild 7.	Schalenplatte aus Feinsand mit anhaftendem Grobsand.....	12
Bild 8.	Das Gewicht der Schale aus anhaftender Stahlsandmischung nimmt mit steigender Gießtemperatur und steigender Verweilzeit zu.....	13
Bild 9.	Schematische Darstellung zur Erklärung verschiedener Schüttgewichte bei den Stahlsandmischungen.....	16
Bild 10.	Erstarrungsverlauf bei 10 min Verweilzeit der Gußstücke aus den Schmelzen Nr. 22, 27, 29 und der in Quarzsand abgegossenen Schmelze Nr. 33	17
Bild 11.	Abkühlungskurven Quarzsand, Versuch 1.....	18
Bild 12.	Abkühlungskurven Stahlsand, Versuch 2	18
Bild 13.	Abkühlung der Schmelze Nr. 34 im Quarzsand, 5 min Verweilzeit	20
Bild 14.	Abkühlung der Schmelze Nr. 33 im Quarzsand, 10 min Verweilzeit	21
Bild 15.	Abkühlung der Schmelze Nr. 32 im Quarzsand, 15 min Verweilzeit	21
Bild 16.	Abkühlung der Schmelze Nr. 23 im Stahlsand, 5 min Verweilzeit.....	22
Bild 17.	Abkühlung der Schmelze Nr. 22 im Stahlsand, 10 min Verweilzeit.....	23
Bild 18.	Abkühlung der Schmelze Nr. 21 im Stahlsand, 15 min Verweilzeit.....	23
Bild 19.	Temperaturverlauf über die Zeit, Schmelze 22, 10 min Verweilzeit, Stahlsand Mischung M2	24
Bild 20.	Temperaturverlauf über die Zeit, Schmelze 27, 10 min Verweilzeit, Stahlsandmischung M3	24
Bild 21.	Temperaturverlauf über die Zeit, Schmelze 29, 10 min Verweilzeit, Stahlsandmischung M1	25
Bild 22.	Temperaturverlauf über die Zeit, Schmelze 33, 10 min Verweilzeit, Quarzsand.....	25
Bild 23.	Gefügebereiche bei den Randproben (schematisch). Querschnitt durch die 15 mm dicke Gußplatte.	26
Bild 24.	Weißerstarrtes Gefüge mit Anteilen an primär ausgeschiedenem Graphit im Übergangsbereich Rand - Mitte einer Gußstückprobe.....	27
Bild 25.	Schmelzen in der Reihenfolge ihrer Stahlsand-Schüttgewichte und der Verweilzeit im Vergleich zu Quarzsand. Mittelproben, geätzt mit 3 %iger alk. HNO ₃	28
Bild 26.	Schmelzen in der Reihenfolge ihrer Stahlsand-Schüttgewichte und der Verweilzeit im Vergleich zum Quarzsand. Mittelproben, geätzt mit 3%iger alk. HNO ₃	29

1. Zusammenfassung

Der Aufbau von metallischen Dauerformen zum Gießen von Eisenlegierungen erfordert einen hohen Energie-, Bearbeitungs- und Materialaufwand. Bei ton- oder kunstharzgebundenen Formverfahren ist neben den austretenden Emissionen ein hoher Energieaufwand zur Aufarbeitung des Formstoffs nötig. Weitgehend emissionsfrei und von hoher Flexibilität für die Abformbarkeit verschiedener Modelle ist das Vakuum-Formverfahren.

Die vorliegende Untersuchung beschäftigte sich mit der grundsätzlichen Durchführbarkeit des Vakuum-Formverfahrens mit Stahlsand statt Quarzsand. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, daß nicht der gesamte Formsand aufbereitet werden muß. Eine Formstoffschale die sich am Gußstück beim Abguß bildet kann über Regenerierungs-Verfahren aufbereitet oder als Kreislaufmaterial recyclet werden. Eine mechanische Trennung des unbelasteten Restsand von Fremdkörpern ist nach derzeitigen Kenntnissen ausreichend. Als Nachteil ist die durch den verwendeten Quarzsand bedingte lange Erstarrungszeit und langsamere Abkühlung zu nennen. Gußstückeigenschaften wie sie in einer Kokille erzeugt werden können, sind mit Quarzsand nicht zu erzielen.

Durch die Verwendung von Stahlsand in verschiedenen Mischungszusammensetzungen sind vielfältige Einflußnahmen auf die Gefügeausbildung möglich. So sind gewünschte Eigenschaften aus dem Kokillenguß (schnelle Erstarrung, feine Graphitlamellen) ebenso zu erzielen, wie Eigenschaften aus dem Sandguß (langsame Abkühlung, Umwandlung des Perlits in Graphit und Ferrit).

Durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Formstoffs Stahlsand entsteht am Rand ein sehr feines oft auch dendritisch ausgebildetes Gefüge. Eine unerwünschte Weißeinstrahlung ist ohne großen Aufwand wie sie zum Beispiel im Kokillengußverfahren durch Vorheizen der Kokille verhindert wird möglich. Bei dem Vakuumverfahren mit Stahlsand kann durch verändern der Korngröße und Mischung verschiedener Korngrößen des Stahlsandes die Abkühlungsgeschwindigkeit in weiten Bereichen variiert werden.

Im Vergleich Stahlsand zu Quarzsand als Formstoff ist der in der Mitte vorliegende A-Graphit im Stahlsand-Vakuumverfahren kleiner als im Quarzsand-Vakuumverfahren. Durch die sehr schnelle Abkühlung im Stahlsand entsteht in den Randbereichen eine weiche ferritische Randschicht. Der Perlitanteil kann bei Verwendung dieses Formstoffs über die Auswahl der Formstoffmischungen, Schichtedicke, Modellsanddicke und Verweilzeit verändert werden. Durch Verlängerung der Verweilzeit des Gußstücks im Formstoff ist ein Zerfall des Perlits in Ferrit und Graphit möglich.

Entgegen der schnellen Ausleerung des Gußteiles aus der Kokille mit dem Ziel der langsameren Luftabkühlung, unter Ausnutzung der verbliebenen Gußstückwärme, kann bei diesem Verfahren das Gußstück in der Form verbleiben. Es wird eine noch langsamere Abkühlung als an Luft erreicht. Die Erstarrungsbedingungen mit Stahlsand als Formstoff sind vergleichbar denjenigen in der Kokille. Die spätere Abkühlung erfolgt eher nach den Bedingungen des Quarzsand-Vakuum-Formverfahrens. Die Zeit zwischen Einguß und Ende der eutektoiden Umwandlung kann maximal um etwa 70 % verkürzt werden. Dies ist aber abhängig von den gewählten Stahlsandmischungen

2. Einleitung

Gußteile werden hauptsächlich in verlorenen Formen mit mineralischen Formstoffen oder in Dauerformen produziert. Verfahrensbedingte Nachteile sind nur mit großem technischem oder finanziellem Aufwand zu verringern.

Werden dagegen die Vorteile beider grundlegenden Gießvarianten zusammengefaßt, ergeben sich folgende Forderungen und Möglichkeiten :

- binderfreier Formstoff,
- geringe umweltbelastende Emissionen,
- hohe Abkühlungsgeschwindigkeit,
- kostengünstige Produktion bei geringer Stückzahl,
- einfache Recyclingfähigkeit des Formstoffs und Vermeidung von Reststoffen.

In Arbeiten der TU Clausthal wurde versucht, die Vorteile körniger Formstoffe und schnell abkühlender Formstoffe in einem innovativen modifizierten Gießverfahren zu vereinen. Besonders geeignet erschien das Vakuum-Formverfahren. Dieses Verfahren, das 1972 in Japan erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt wurde /1/, verwendet binderfreie Formstoffe und zeichnet sich durch geringe umweltbelastende Emissionen aus. In der Praxis sind mineralische Formstoffe im Einsatz, meist Quarzsande. In den Untersuchungen der TU Clausthal wurden zur Erhöhung der Abkühlungsgeschwindigkeit Stahlsandmischungen als Formstoff eingesetzt.

3. Beschreibung des Vakuum-Formverfahrens

Das Vakuum-Formverfahren arbeitet als binderloses Formverfahren mit Unterdruck oder Vakuum. Zur Vakuumerzeugung am Modell ist eine speziell angefertigte Modellplatte mit entsprechenden Düsen zur Luftabsaugung (Bild 1) notwendig.

Die Modellplatte wird auf einen Vakuumkasten aufgesetzt. In diesem „Vakuumkasten“ wird mit einer Vakuumpumpe Unterdruck erzeugt (Bild 2). Durch die Düsen kann die Luft zwischen einer erwärmten aufgelegten Folie auf der Modellplatte abgesaugt werden, so daß sich die Folie konturengenau an das Modell anlegt. Ein Formkasten wird aufgesetzt und mit Sand gefüllt. Vorverdichtet wird durch kurzes Rütteln oder Vibrieren. Nach Auflegen einer weiteren Folie auf den Sandrücken muß im Formkasten ein weiteres Vakuum erzeugt werden. Das Vakuum an der Modellplatte und im Vakuumkasten wird abgeschaltet. Die Form kann von der Modellplatte abgenommen werden.

Nach dem Zusammensetzen des Ober- und Unterkastens erfolgt der Abguß wie bei herkömmlichen Verfahren /1/2/.

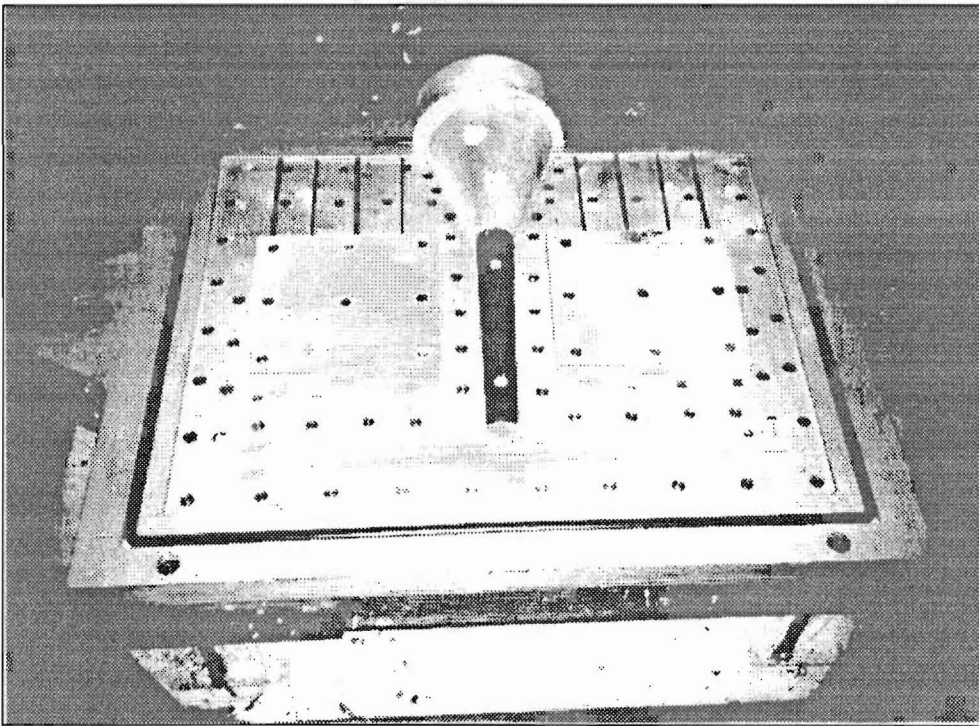


Bild 1. Modellplatte auf dem Arbeitstisch der Vakuum-Formanlage. Sichtbar sind die Absaugöffnungen (Düsen) zur Erzeugung des Vakuums

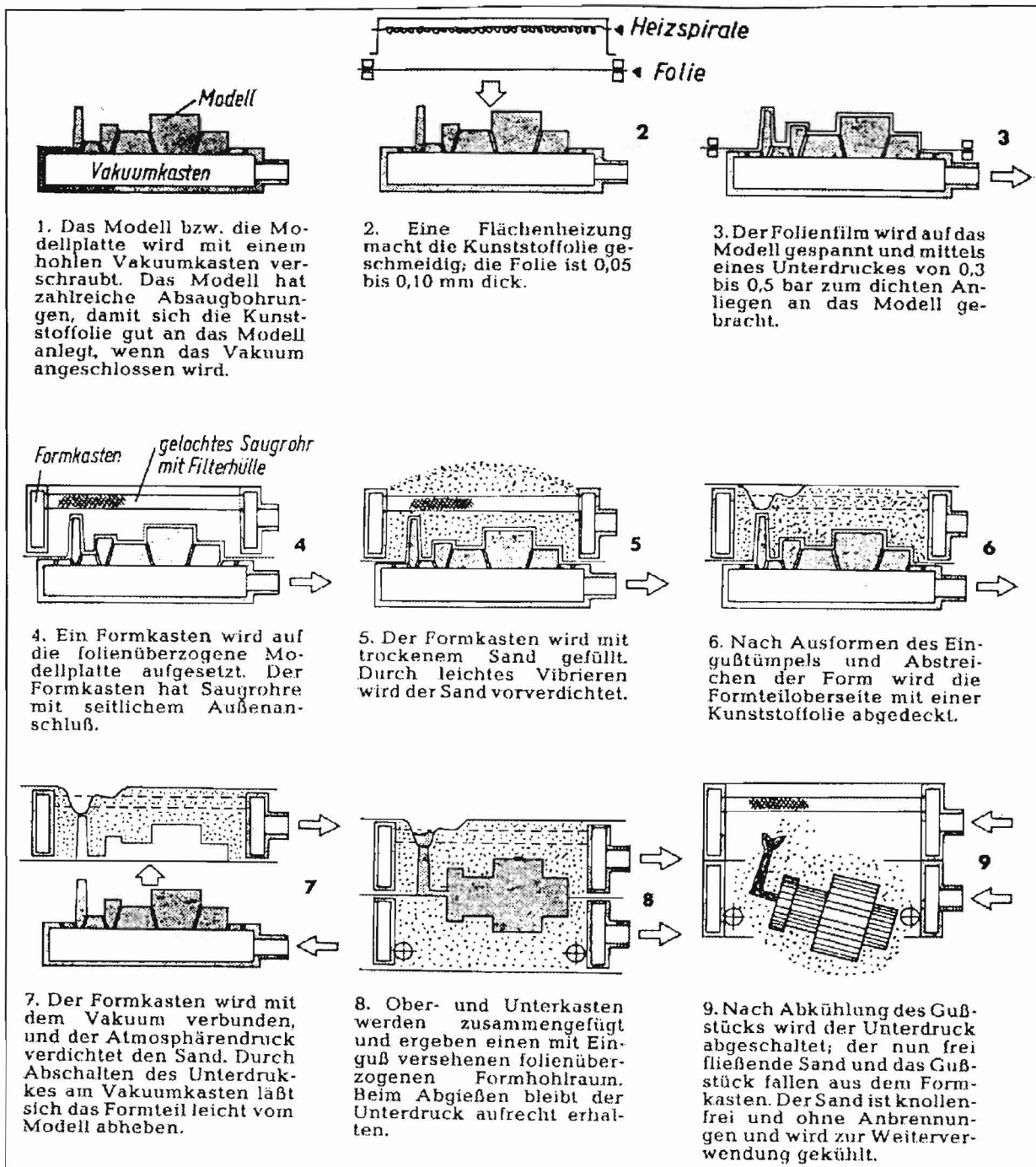


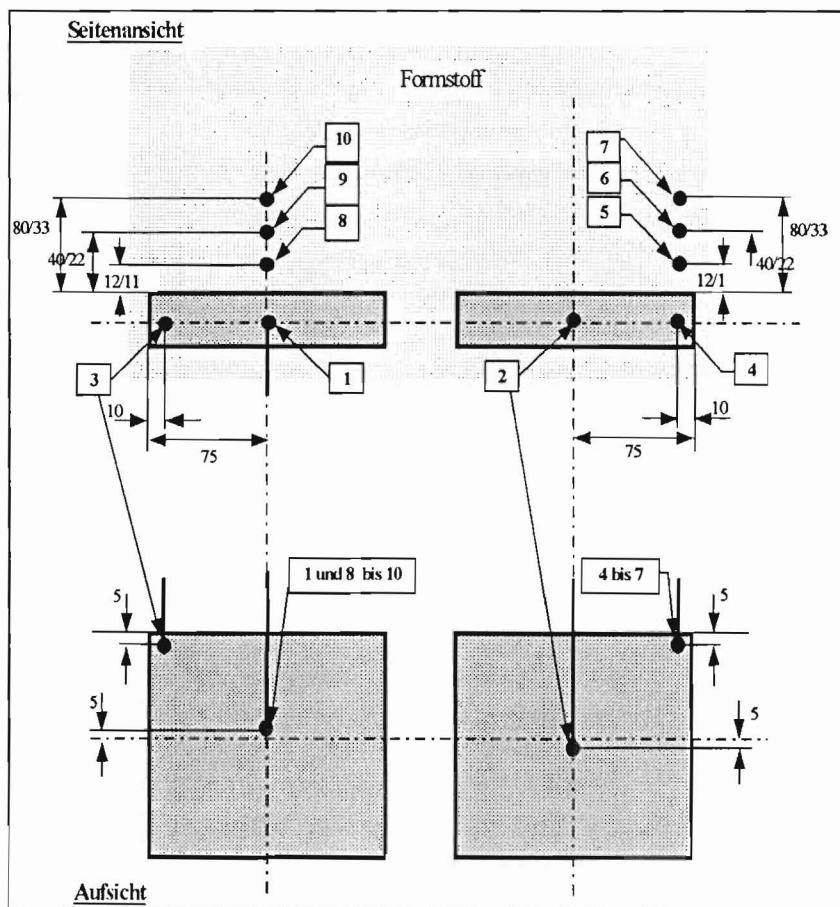
Bild 2. Arbeitsablauf bei der Formherstellung nach dem Vakuum-Formverfahren /3/

4. Versuchsaufbau

Der Einsatz von Quarzsand als Formstoff im Vakuum-Formverfahren ist ausführlich in den Untersuchungen /1/ bis /3/ beschrieben. Für Stahlsand als Formstoff findet sich nur eine Bemerkung in /4/: „So läßt sich bei Stahlkugeln mit 0,6 mm Dmr. zwar eine Volumenausfüllung von 64 % erreichen, doch ist die Druckfestigkeit mit 18 N/cm² niedrig. Aufgrund des Eigengewichtes und der ungenügenden Druckfestigkeit kann eine aus Stahlkugeln gebildete Form während des Gießens leicht zusammenbrechen.“

So war die Aufgabe im ersten Teil dieser Untersuchung stabile Formen zu erzeugen. Die Stabilität der Formen ist abhängig von der Art der Folie, der Art und Dicke der Schichte, der Größe der Formstoffteilchen und dem maximal möglichen Absaugvolumen der Vakuumpumpe. Weiteren Einfluß haben die Gießtemperatur und die Gießgeschwindigkeit.

Zur Verbesserung der Gußstückoberfläche wurden Untersuchungen durchgeführt, in denen die Schichte in unterschiedlichen Schichtdicken modell- und/oder formstoffseitig aufgetragen wurde. Begleitend dazu mußte eine praxisgerechte Gießtemperatur gefunden werden.



Mischungen aus Stahlsanden mit unterschiedlichen Korngrößen und Mischungsverhältnissen führen zu verschiedenen Dichten des Formstoffs. Veränderte Dichteverhältnisse im Formstoff wirken sich auf die Wärmeableitung und damit auf die Gefügeausbildung im Gußstück aus. Die Messung der Schüttgewichte und die metallographische Prüfung zeigen diese Zusammenhänge auf.

Der Probekörper bestand aus zwei plattenförmige Gußstücke 150x150x15 mm. Bild 3 zeigt die Lage und Maße der Gußstücke und die Anordnung der Thermoelemente.

Bild 3. Lage und Maße der Gußstücke und Anordnung der Thermoelemente (Nr. 1 bis 10)

Für die Versuche ist nah- eutektisches Gußeisen verwendet worden.

Die Werte der chemischen Zusammensetzung streuten bei den Versuchen in folgenden Bereichen:

C = 3,07 - 3,55 in %

Si = 2,18 - 2,66 in %

Mn = 0,06 - 0,38 in %

P = 0,06 - 0,12 in %

S = 0,02 - 0,14 in %

CE = 3,90 - 4,46

Sc = 0,83 - 0,98

Zu den vergleichenden Versuchen wurden nur Proben herangezogen die in der chemischen Zusammensetzung dicht beieinander lagen.

Als Impfmittel diente bei den Schmelzen Nr. 1 bis Nr. 17 FeSi 75, ab Schmelze 18 Inobar.

Verwendet wurde eine Vakuumformanlage der Firma Wagner Sinto, die freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde.

5. Versuchsdurchführung

In den ersten Versuchen konnten die grundlegenden Probleme der Formfestigkeit durch Veränderung der Modellplatte, des Formkastens und durch Auftragen einer Feinsandschicht auf die auf der Modelloberfläche liegende Folie beseitigt werden.

In die Modellplatte wurden mehr Düsen eingesetzt. Der Formkasten erhielt zusätzliche Absaugöffnungen durch den Einbau von sogenannten „Schlitzrohren“ (Bild 4) und in die Anlage wurde eine Vakuumpumpe mit höherer Leistung eingebaut.

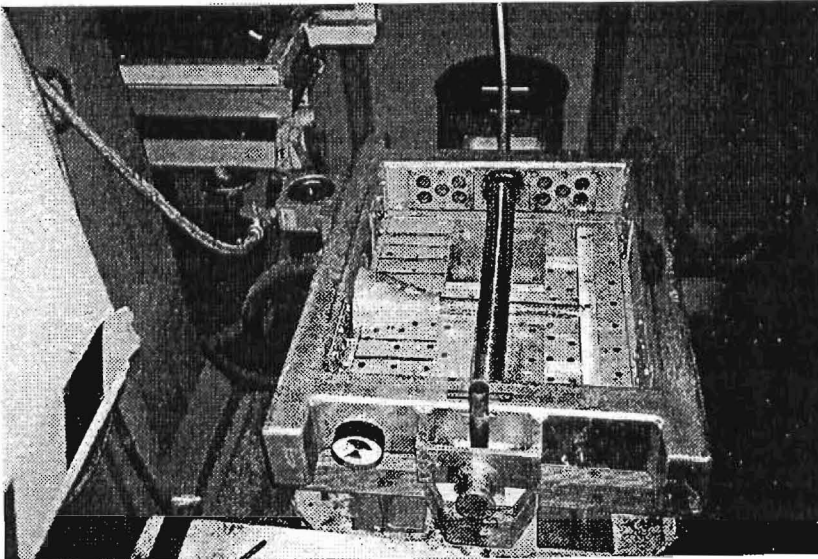
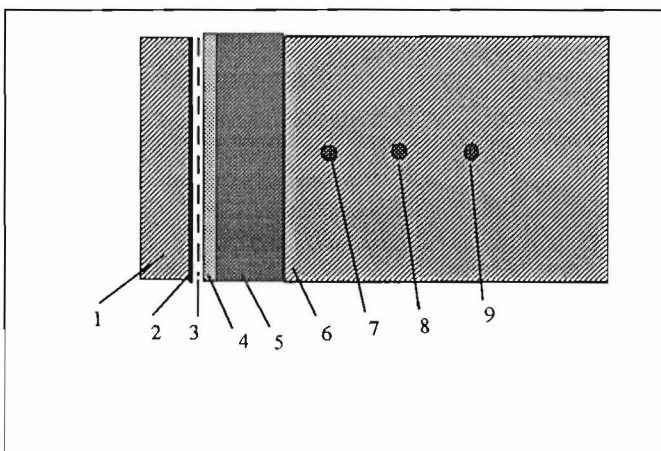


Bild 4. „Schlitzrohre“ erhöhen die Absaugmenge der Luft aus dem Formkasten

Ausgehend von der Modell- bzw. Gußstückoberfläche ergibt sich folgender Schichtaufbau zwischen Modell bzw. Gußstück: Direkt am Modell bzw. Gußstück anliegend die Folie, dann die Schlichteschicht und eine 5 bis 7 mm dicke Schicht aus feinem Stahlsand. Die eigentliche Formstoffmischung füllt den Rest des Formraumes aus (Bild 5).



- 1 - Gußstück
- 2 - Gußstückoberfläche
- 3 - Folie
- 4 - Schlichte
- 5 - feiner Modellstahlsand
- 6 - allgemeine Formstoffmischung
- 7 - Thermoelemente 5 bzw. 8
- 8 - Thermoelemente 6 bzw. 9
- 9 - Thermoelemente 7 bzw. 10

Bild 5. Beim Abguß vertikaler Aufbau der verschiedenen Schichten zwischen Gußstück und Formstoff

5.1. Untersuchung der Formstoffstabilität

Die Abgußtemperatur betrug in den ersten Versuchen ca. 1350 °C, der Unterdruck 0,4 bis 0,7 bar. Die Formstoffkörner des Stahlsandes bestanden zu 99,6 % aus Stahlsandkörnern mit einer Größe von mehr als 1,0 mm Dmr. Bei den ersten Abgüssen kam es zu Deformationen der Form. Als Ursache wurde eine ungenügende Ausbildung der Kondensatschicht festgestellt. Durch die einlaufende Schmelze wird vor der Schmelzfront die Folie vergast. Die Dämpfe werden in den Formstoff eingesaugt und kondensieren an den kühleren Formstoffkörnern. Sind die Formstoffkörner zu groß, so bildet sich keine feste Verbindung zwischen den Körnern. Die Gasdurchlässigkeit wird zu hoch und im Extremfall kollabiert die Form. Die Schmelze kann mit in den Formstoff eingesaugt werden (Bild 6) und es entsteht eine sehr raue Oberfläche.

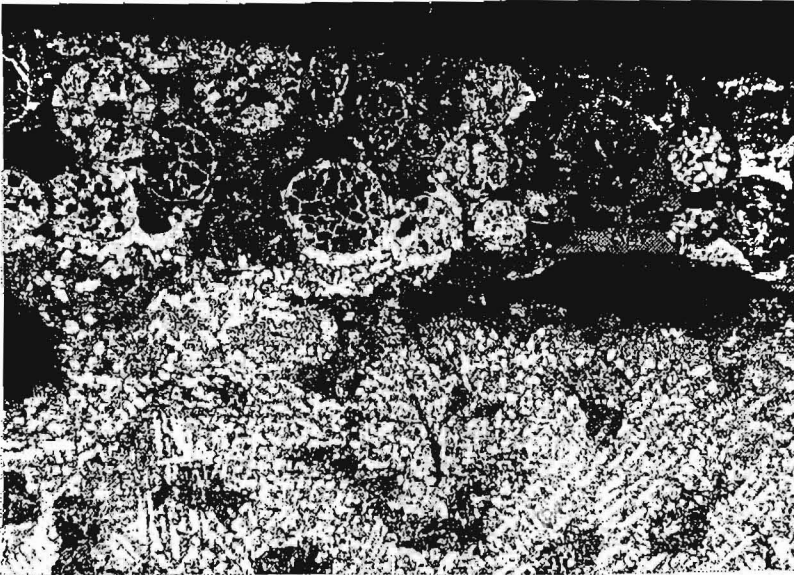


Bild 6. In den Formstoff eingedrungene Schmelze.

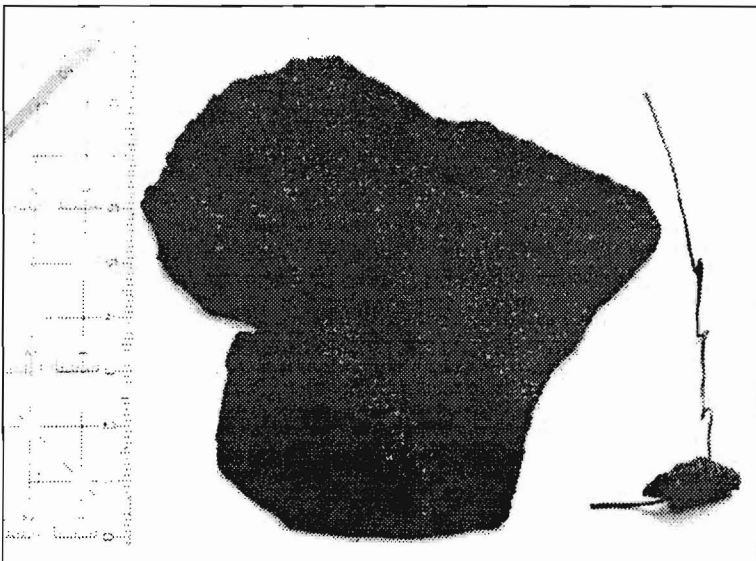
5.2. Untersuchung verschiedener Schlichteschichten und Arten der Aufbringung

Zur Bewertung des Schlichteeinflusses auf die Oberflächengüte der Gußstücke sind unterschiedliche Schlichteschicht-Dicken modell- und/oder formstoffseitig auf die modellseitige Folie aufgetragen worden. Als Schlichte diente eine Fertigschlichte auf Zirkonbasis (Disopast 3146). Die Dichte betrug bei 20 °C ca. 2,2 g/cm³ mit einem Feststoffanteil von ca. 73 %. Bei modellseitigem Schlichteauftrag ist die Oberflächengüte ungenügend. Daher sollte modellseitig keine Schlichte aufgetragen werden. Die einfließende Schmelze reißt die Schlichteschicht auf, da die unter der Schlichteschicht als Träger dienende Folie verdampft. Gute Oberflächengüten der Gußstücke ergaben sich bei einem ein- oder zweimaligem formstoffseitigen Schlichteauftrag. Dabei wird die Gasdurchlässigkeit in Richtung des Formstoffs herabgesetzt und die Bildung einer geschlossenen Kondensatschicht der vor der Schmelzfront verdampfenden Folie begünstigt.

Für ausreichende Oberflächengüten benötigt der eingesetzte metallische Feinsand eine Dicke der Schlichteschicht von mind. 100 µm. Gute Oberflächen werden bei Schlichteschicht-Dicken von 130 bis 150 µm erreicht.

Nicht zu unterschätzen ist die Wirkung der Schlichte auf die Ableitung der Wärme aus der Schmelze in den Formstoff.

5.3. Untersuchung der Gießtemperatur und der Formstoffschale



In einer weiteren Versuchsreihe ist der Einfluß von Gießtemperatur, Verweilzeit der Gußstücke in der Form und Dicke des aufgebrachtten metallischen Feinsandes auf die Ausbildung einer die Gußstücke umhüllende Schale untersucht worden (Bild 7).

Bild 7. Schalenplatte aus Feinsand mit anhaftendem Grobsand

Mit steigender Gießtemperatur und/oder mit zunehmender Verweilzeit der Gußstücke in der Form wird das Schalengewicht größer (Bild 8). Bei in dickeren Schichten aufgebrachtem metallischem Feinsand nimmt das Schalengewicht ebenfalls zu. Die Schmelztemperatur beeinflusst die Lage des Kondensationspunktes der Foliengase. Je tiefer die Foliengase in den Formstoff eingedrungen sind, um so mehr Formstoffteilchen verbinden sich. Das heißt desto mehr organisch belasteter Formstoff entsteht. Die Schale besteht überwiegend aus dem feinem Stahlsand, Schlichte und nicht vercrackten Folienresten.

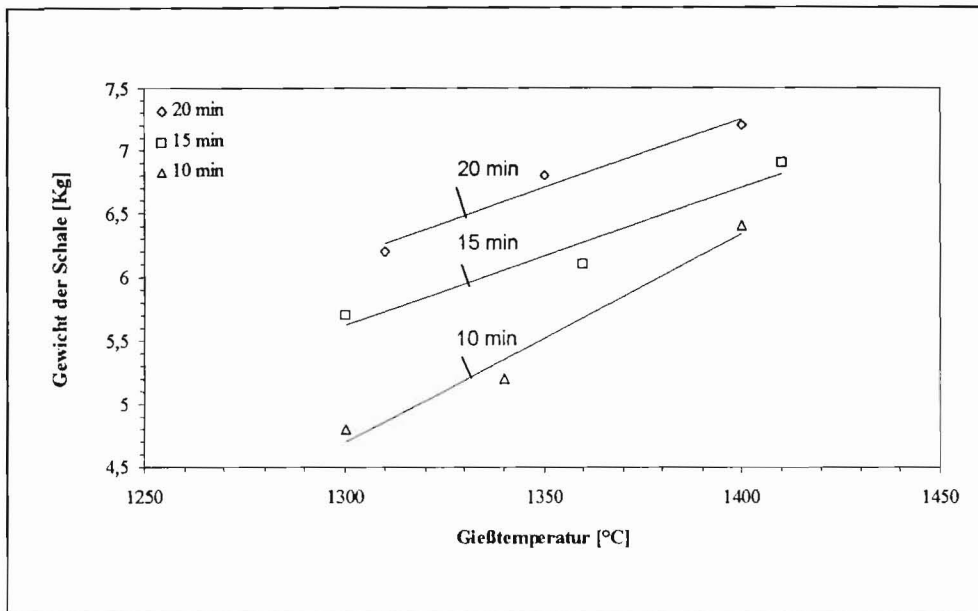


Bild 8. Das Gewicht der Schale aus anhaftender Stahlsandmischung nimmt mit steigender Gießtemperatur und steigender Verweilzeit zu.

Die Trennung des organisch belasteten Stahlsandes vom unbelasteten ist durch die erhaltene Rieselfähigkeit des unbelasteten Sandes sehr leicht möglich. Die Schale ist mit mechanischen Mitteln leicht zu entfernen.

Ist die Schmelztemperatur zu hoch, können Spritzer während des Eingusses zur frühzeitigen Zerstörung der Folie und zum „Formenkollaps“ führen.

Die Gießtemperatur sollte so niedrig wie möglich sein, die Verweilzeit kurz, je nach zu erzielenden mechanischen Eigenschaften des Gußstücks. Die unbedingt notwendige Schichtdicke des Feinsandes muß noch ermittelt werden. Hier könnte eine magnetische Fixierung feiner Stahlsandschichten bei der Formherstellung eine gleichmäßige Verteilung an schwierigen Modellkonturen unterstützen. Chemische Untersuchungen müßten die organischen und anorganischen Belastungen des Stahlsandes klären. Der lose abfallende Sand ist weitgehend unbelastet und kann dem Kreislauf wieder zugeführt werden.

5.4. Untersuchung des Formstoffes und der Formstoffmischung

Außer Versuchen zur Beeinflussung der Abkühlungsgeschwindigkeit mit verschiedenen Stahlsandmischungen wurden Vergleichsversuche mit Quarzsand der Sorte H 32 durchgeführt. Die Stahlsandmischung bestand aus grobem Korn mit Durchmessern von bis zu 1,6 mm und feinem Korn mit Durchmessern zwischen 0,1 und 0,3 mm.

Die Mischungsverhältnisse der Sandsorten zeigt Tafel 1.

In Tafel 2 sind die in den Sandversuchen ermittelte spezifische theoretische Oberfläche S_{th} , die mittlere Korngröße $M_{calc.}$, die ASF-Kornfeinheitsnummer, die Volumenausfüllung und das Schüttgewicht der verschiedenen Mischungen eingetragen.

Mischung	Grobsand in %	Feinsand in %
M1	75	25
M2	55	45
M3	35	65

Tafel 1. Mischungsverhältnisse des Stahlsandes

	M1	M2	M3	Quarzsand
S_{th}	15	20 bis 22	28 bis 30	91
$MK_{calc.}$	0,32	0,25 bis 0,26	0,16 bis 0,18	0,26
ASF	8,26 bis 8,80	11,42 bis 12,37	16,16 bis 16,95	52
Volumenausfüllung in %	59	53	55	52
Schüttgewicht in g/cm^3	4,63	4,20	4,29	1,48-1,55

Tafel 2. Sandparameter

Bei gleichem Formstoff ist in diesen Versuchen zur Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit nach gründlicher Suche des wichtigsten Faktors die Dichte verwendet worden. Sie wird durch das Schüttgewicht angegeben.

Das Schüttgewicht berechnet sich aus:

$$\text{Schüttgewicht} = \frac{\text{Gewicht}}{\text{Volumen}} \text{ in } g/cm^3$$

Mit steigendem Schüttgewicht waren die Mischungen demnach in der Reihenfolge

$$M2 \Rightarrow M3 \Rightarrow M1$$

anzuordnen.

Zur Erklärung wurden Untersuchungen von Miura /2/ herangezogen die zeigten, daß mit abnehmender Korngröße des Sandes die Volumenausfüllung (Schüttgewicht/ Dichte) geringer wird. Bei der Mischung von Gleichkornsand (0,2 mm Dmr.) mit Feinsandbestandteilen (< 0,05 mm Dmr.) erreichte Miura eine weitere Erhöhung der Packungsdichte (Schüttdichte) mit einem Maximum bei 30 % Anteil an Feinkornsand; „die Packungsdichte nimmt ab, wenn dieser unter- oder oberhalb von 30 % liegt. Dies bedeutet, daß die Zwischenräume der Sandkörner von 0,2 mm günstig durch Mischen mit 30 % Feinbestandteilen ausgefüllt werden, während dieses bei einem Anteil unter 30 % nicht der Fall ist./2/“

Das Verhältnis der Größe der Feinbestandteile zu der Größe der groben Sandkörnern betrug bei den Untersuchungen von Miura 1:4. Übertragen auf den Stahlsand gilt in diesen Versuchen ebenfalls ein Verhältnis 1:4. Die Mischungen des Stahlsandes wurden also im Bereich des Maximums der erzielbaren Schüttdichte eingestellt. Dies war zu Versuchsbeginn bei der Überlegung den Sand nach den Mischungsverhältnissen einzustellen nicht erkennbar.

Nach Miura /2/ lag die Volumenausfüllung des Quarzsandes bei ~ 56 % (Gleichkornsand von 0,2 mm Dmr.) und ~ 68 % bei 30 % Anteil an Feinbestandteilen (Tabelle 2). Die Volumenausfüllungen des Stahlsandes liegen zwischen 53 bis 59 %. Es sind aber auch höhere Volumenausfüllungen vorstellbar.

Zur Erklärung der ermittelten Packungsdichte, die nicht der Reihenfolge der Mischungsverhältnisse entspricht, dient Bild 9. Nach dieser Theorie liegt bei einer Mischung, die nur aus rundem Korn besteht, das Korn dicht aneinander (Bild 9 a). Kommen Feinsandanteile hinzu, so werden die Zwischenräume zwischen den Kugeln aufgefüllt (Bild 9 b). Dies entspricht der Mischung 1. Kommen genauso viele passende Feinsandvolumina hinzu wie Hohlräume zur Verfügung stehen, ist das maximale Schüttgewicht für diese zwei Sandsorten erreicht (Bild 9 c). Bei etwas höheren Anteilen wirkt der Feinsand wie ein Abstandhalter, der größere Zwischenräume verursacht (Bild 9 d). Dieses würde Mischung 2, also der Mischung mit dem geringsten vorliegendem Schüttgewicht entsprechen. Bei hohen Feinsandanteilen liegt das grobe Korn in einer Feinsandmatrix vor. Hier nimmt das Hohlraumvolumen wieder ab (Bild 9 e). Dieses entspricht Mischung 3. Da Gleichkornsande mit abnehmenden Durchmesser geringere Schüttdichten aufweisen, lag die Mischung unterhalb des Schüttgewichtes von Mischung 1. Die Menge des groben Sandes wird prozentual geringer und somit auch der Gewichtsanteil.

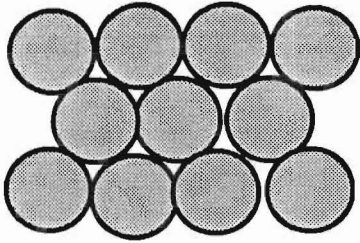


Bild 9.a

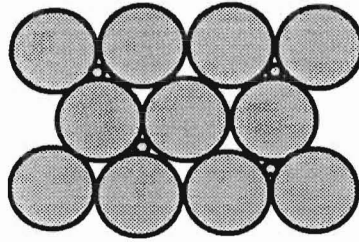


Bild 9.b

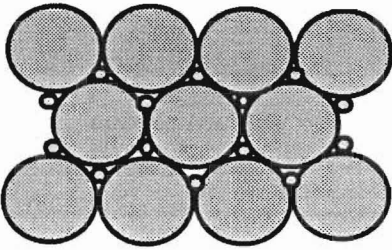


Bild 9.c

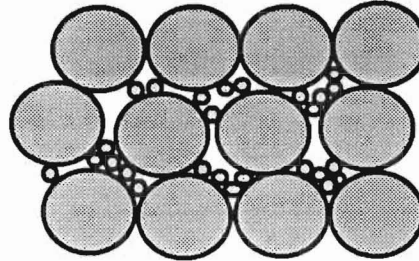


Bild 9.d

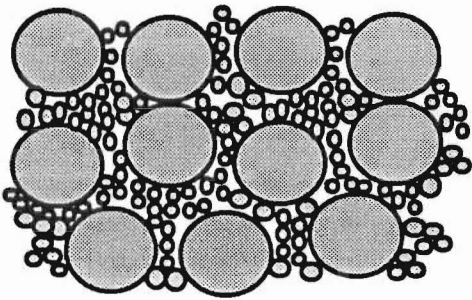


Bild 9.e

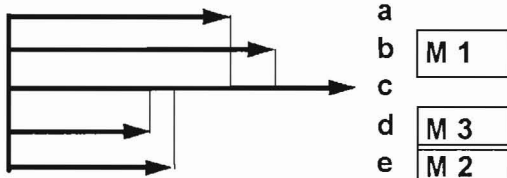


Bild 9.f

Bild 9. Schematische Darstellung zur Erklärung verschiedener Schüttgewichte bei den Stahlsandmischungen

5.5. Untersuchung des Einflusses der Formstoffe auf das Abkühlverhalten der Schmelze

5.5.1. Einfluß der Formstoffmischung

Die eutektische Erstarrung ist mit steigendem Schüttgewicht des Formstoffs, d.h. bei höherer Wärmeabfuhr früher abgeschlossen (Bild 10). Im Quarzsand kühlt die Schmelze am langsamsten ab. Das Zeitintervall der eutektischen Erstarrung ist gegenüber den Stahlsanden wesentlich länger.

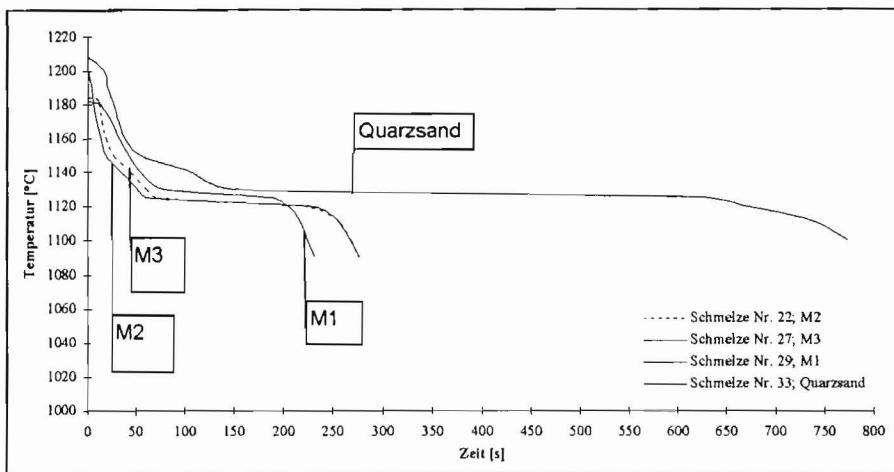


Bild 10. Erstarungsverlauf bei 10 min Verweilzeit der Gußstücke aus den Schmelzen Nr. 22, 27, 29 und der in Quarzsand abgegossenen Schmelze Nr. 33

Zur Messung der Temperaturen im Formstoff nach dem Einguß der Schmelze wurden durch eine „Kabelschleuse“ Thermoelemente in den Formstoff und den Formhohlraum eingeführt (Bild 3, Anordnung der Thermoelemente).

In den ersten Versuchen wurden 2 Thermoelemente (Nr. 1 und 3 bzw. 2 und 4) eingesetzt. In den weiteren Versuchen hatte jedes Gußstück 5 Meßstellen. Thermoelement 1 und 2 neben der Mitte der Gußstücke. Thermoelement 3 und 4 am Rand, abgewandt vom Eingußtrichter, um Wärmeeinflüsse auszuschließen. Die Thermoelemente 2 und 4 dienten zur Aufzeichnung der Abkühlungsbedingungen durch den Formstoff im Gußstück. Für die Aufnahme des Temperaturfeldes im Formstoff selbst wurden die Thermoelemente 5 bis 7 über dem Rand des Gußstückes und 8 bis 10 über der Mitte des Gußstückes angeordnet. Der Einbau der Thermoelemente 5 bis 7 erfolgte abgewandt vom Eingußtrichter. Wärmeeinflüsse durch ihn konnten weitgehend verhindert werden. Die Abstände der Thermoelemente 5 bis 7 und 8 bis 10 betragen bei den Versuchen Nr. 4 bis 14 12, 40 und 80 mm von der Oberfläche. In den weiteren Versuchen Nr. 15 bis 35 erfolgte eine Reduzierung des Abstandes auf 11, 22 und 33 mm.

Die Temperaturkurven (Bild 11 und 12) der ersten Versuche zeigten die prinzipiellen Unterschiede zwischen Quarz- und Stahlsand auf. Bei Quarzsand ist eine langsame eutektische Erstarrungszeit mit anschließender kontinuierlicher Abkühlung festzustellen. Stahlsand durchläuft die eutektische Erstarrung schnell und

geht auf einen „quasi“ konstanten Wert, von dem die weitere Abkühlung nur sehr langsam erfolgt. Am Rand der Gußstücke verläuft die eutektische Erstarrung bei Quarz- und Stahlsand in einem kurzen Zeitintervall. Die Erstarrung ist nur am Knickpunkt in der Kurve zu erkennen.

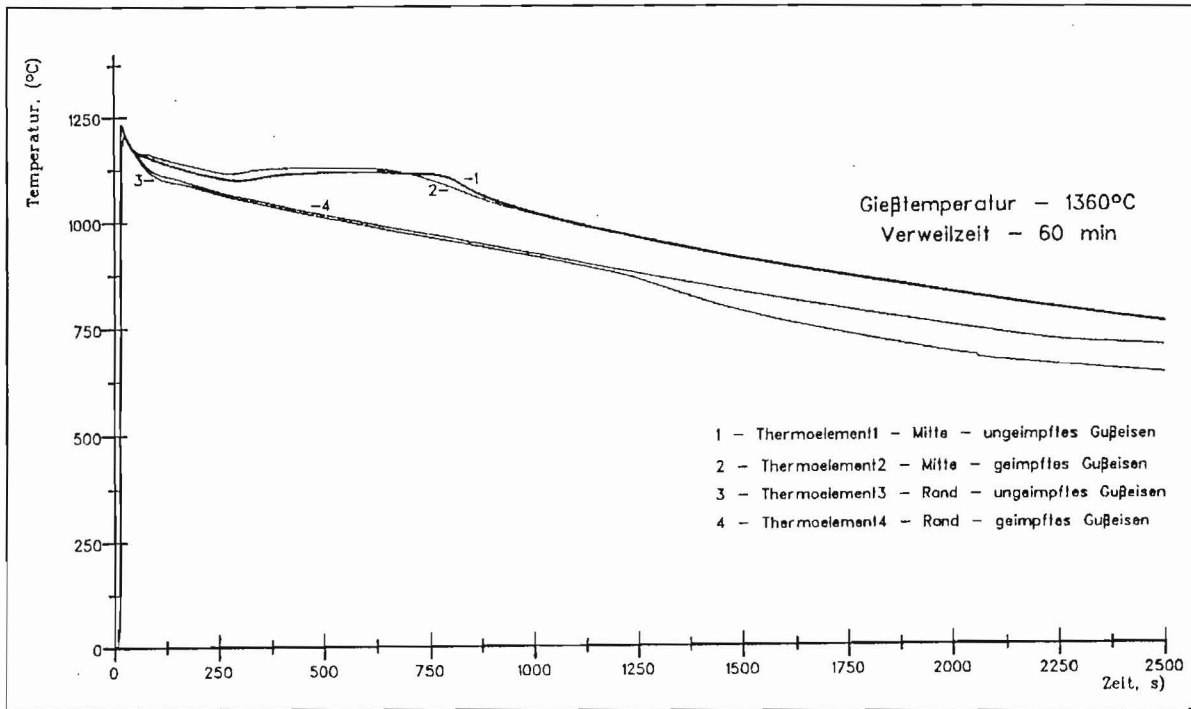


Bild 11. Abkühlungskurven Quarzsand, Versuch 1

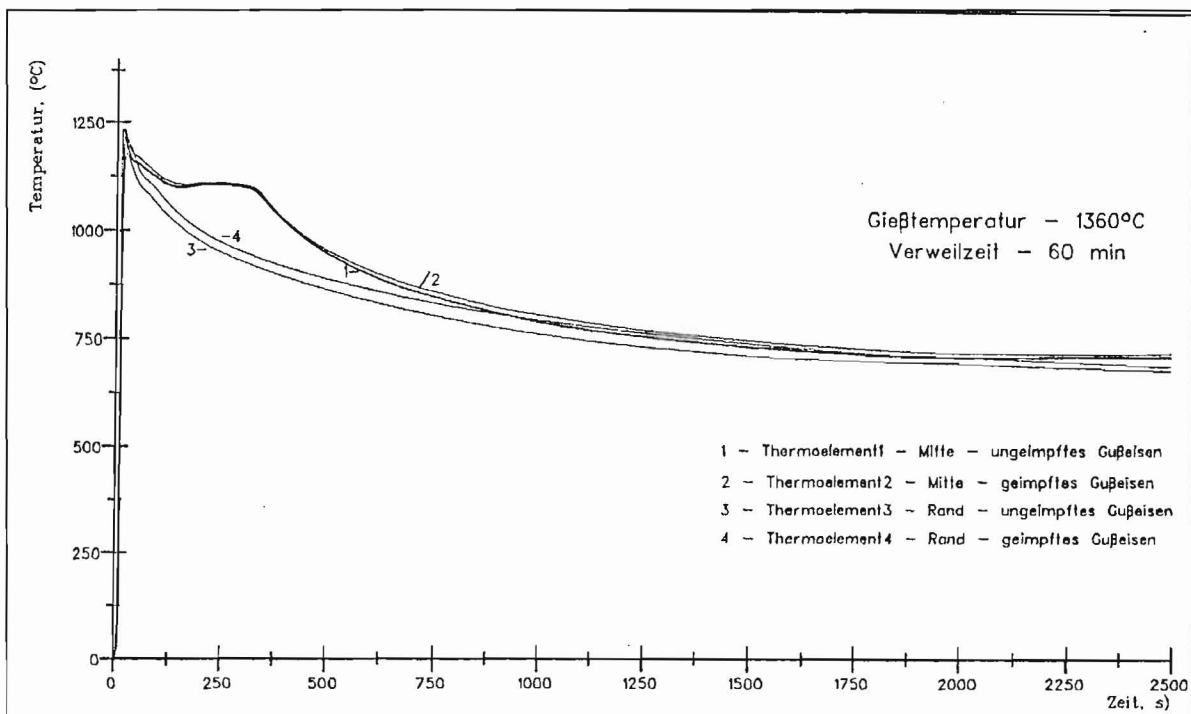


Bild 12. Abkühlungskurven Stahlsand, Versuch 2

Um Untersuchungen der Formstoffmischung und Verweilzeit durchzuführen, waren für die folgenden Versuche konstante Schlichtedicken und verringerte Dicke der Feinsandschicht auf 5 bis 7 mm notwendig.

Untersuchungsschwerpunkte der Versuche Nr. 15 bis 35:

- Bei konstanter Mischung des Formstoffs den Einfluß der Verweilzeit auf das Gefüge der Gußstücke zu bestimmen.
- Bei konstanter Verweilzeit den Einfluß der Formstoffmischung zu untersuchen.

Die Voraussetzung annähernd gleicher chemischer Zusammensetzung, Schlichtedicke, gleichem Unterdruck, Impfmittel und tatsächlich eingehaltener Verweilzeit galt für folgende Schmelzen:

Sandsorte	Schmelze Nr.	veränderte Parameter
Quarzsand 1,48 -1,55 g/cm ³	34	5 min
	33	10 min
	32	15 min
Stahlsand (Mischung M2) 4,20 g/cm ³	23	5 min
	22	10 min
	21	15 min
Stahlsand (Verweilzeit 10 min)	22	M2 4,20 g/cm ³
	27	M3 4,29 g/cm ³
	29	M1 4,63 g/cm ³

Tafel 3. Auswahl einiger untersuchter Schmelzen

Mischung M2 wurde zur Beurteilung des Einflusses der Verweilzeit beim Stahlsand herangezogen. Die Untersuchung der Formstoffmischung erfolgte bei einer Verweilzeit von 10 min.

5.5.2. Einfluß der Verweilzeit

5.5.2.1. Quarzsand

Mit zunehmender Verweilzeit des Gußstückes in der Form verlängerte sich die Zeit bis zum Ende der eutektischen Erstarrung. Erfolgte das Ende der Erstarrung bei 5 und 10 min Verweilzeit nach dem Ausleeren während der anschließenden Luftabkühlung, so war bei der Ausleerung nach 15 min die eutektische Erstarrung bereits im Formstoff abgeschlossen. Teilweise ist am Rand der Gußstücke noch eine Unterkühlung bei der eutektischen Erstarrung festzustellen. Insgesamt ist die Abkühlung im Quarzsand langsam und wird durch eine frühe Ausleerung beschleunigt (Bild 13 bis 15).

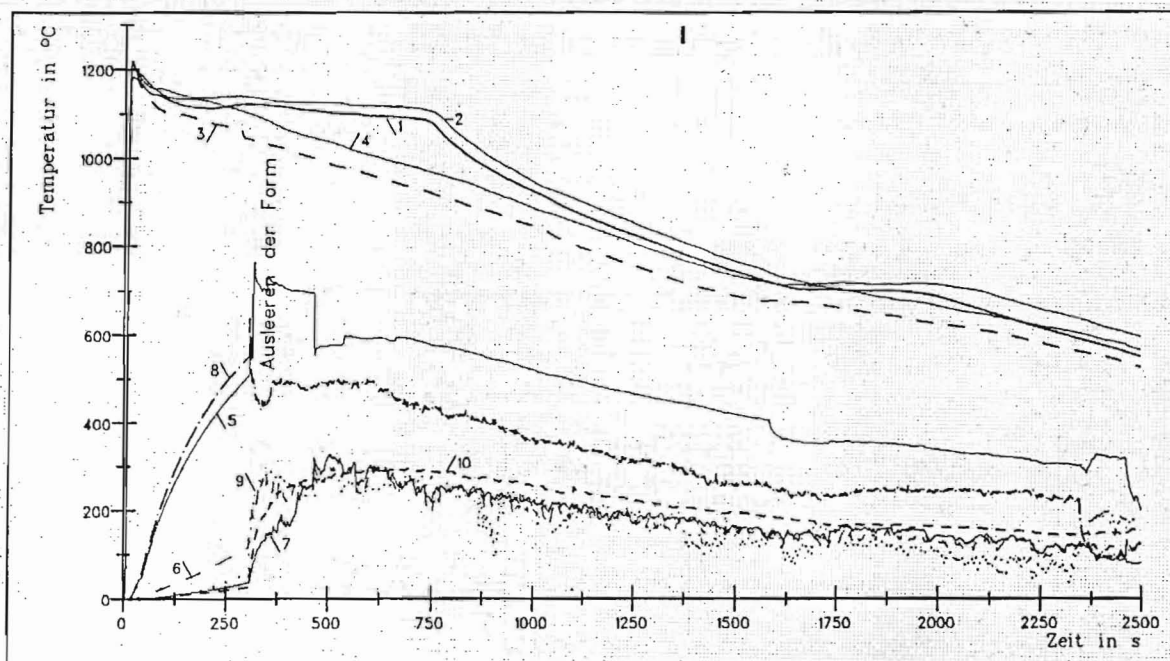


Bild 13. Abkühlung der Schmelze Nr. 34 im Quarzsand, 5 min Verweilzeit

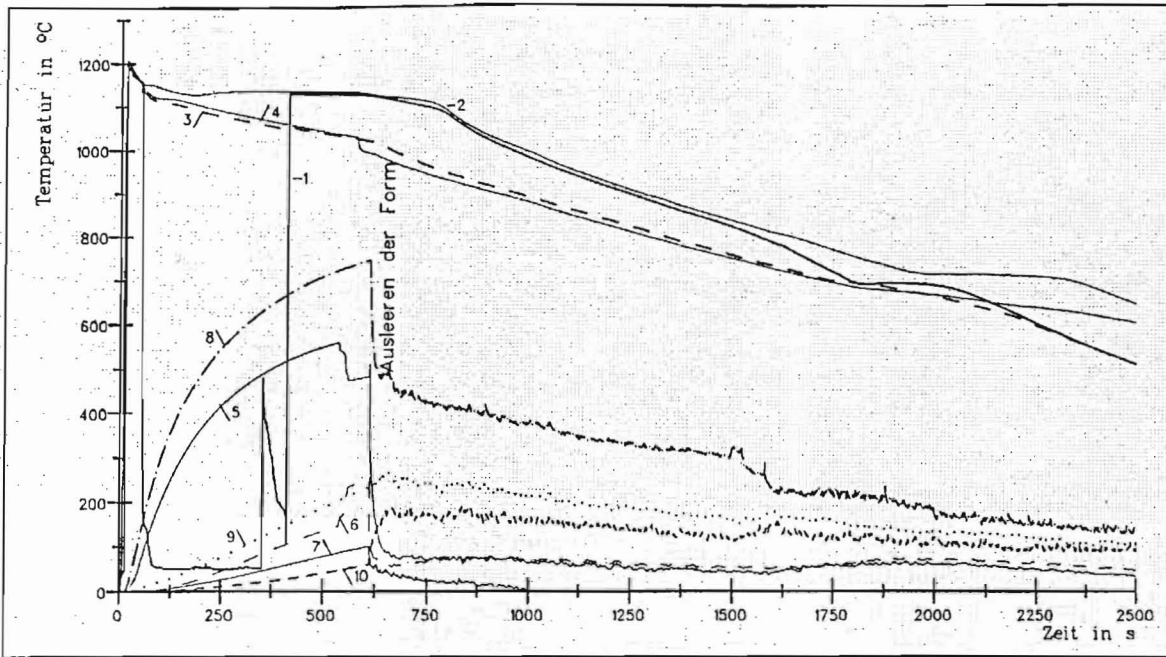


Bild 14. Abkühlung der Schmelze Nr. 33 im Quarzsand, 10 min Verweilzeit

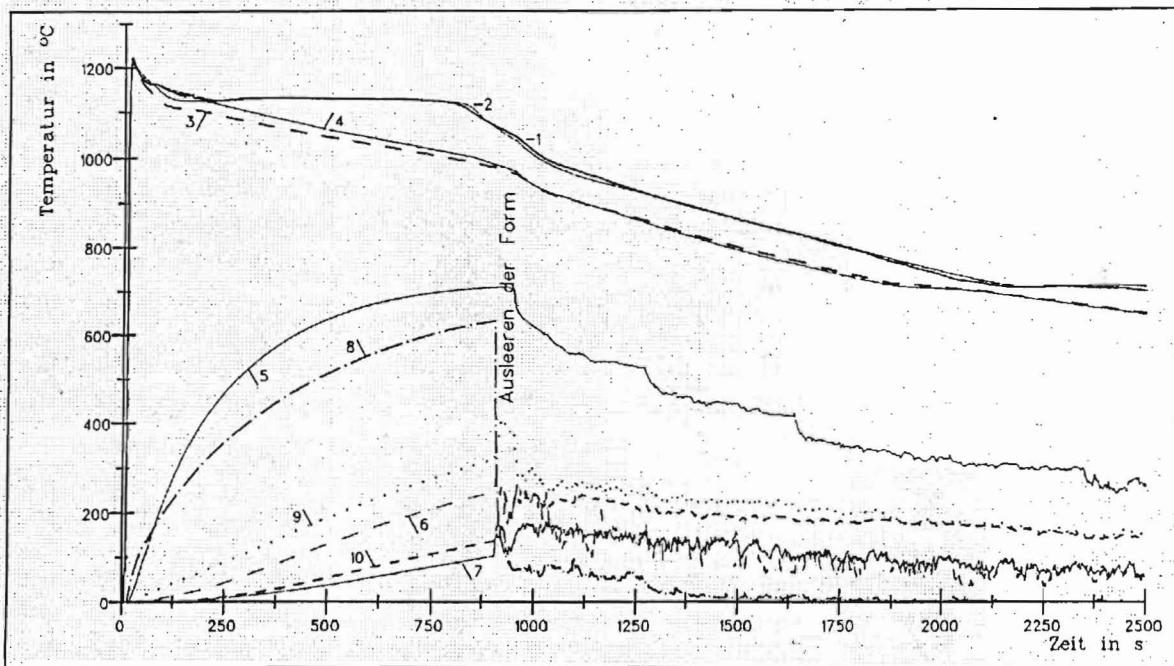


Bild 15. Abkühlung der Schmelze Nr. 32 im Quarzsand, 15 min Verweilzeit

5.5.2.2. Stahlsand

Im Stahlsand ist die eutektische Erstarrung vor dem Ausleeren des Gußstücks aus der Form beendet. Somit liegen gleiche Erstarrungsbedingungen trotz verschiedener Verweilzeiten von 5, 10 und 15 min vor. Die Zeit bis zur eutektoiden Umwandlung bei 10 und 15 min Verweilzeit ist fast gleich, bei 5 min Verweilzeit des Gußstückes kürzer. Das Zeitintervall der eutektoiden Umwandlung wird mit längerer Verweildauer größer (Bild 16 bis 18). Die Abkühlung nach der eutektoiden Umwandlung erfolgt sehr langsam, besonders bei 15 min Verweilzeit.

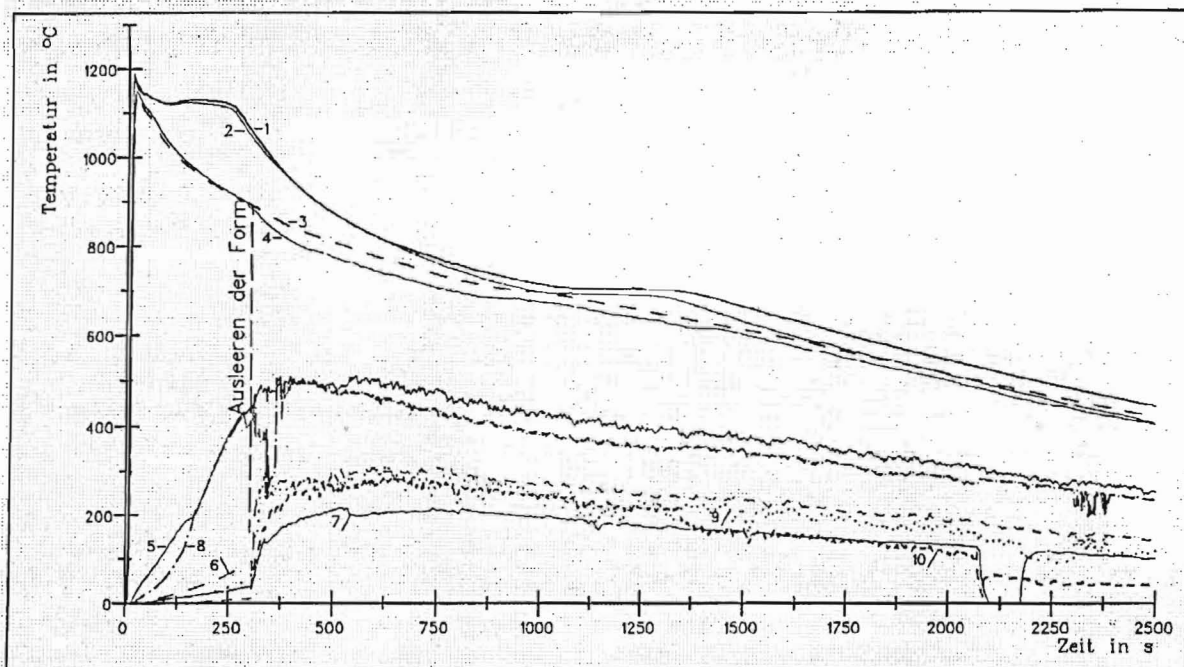


Bild 16. Abkühlung der Schmelze Nr. 23 im Stahlsand, 5 min Verweilzeit

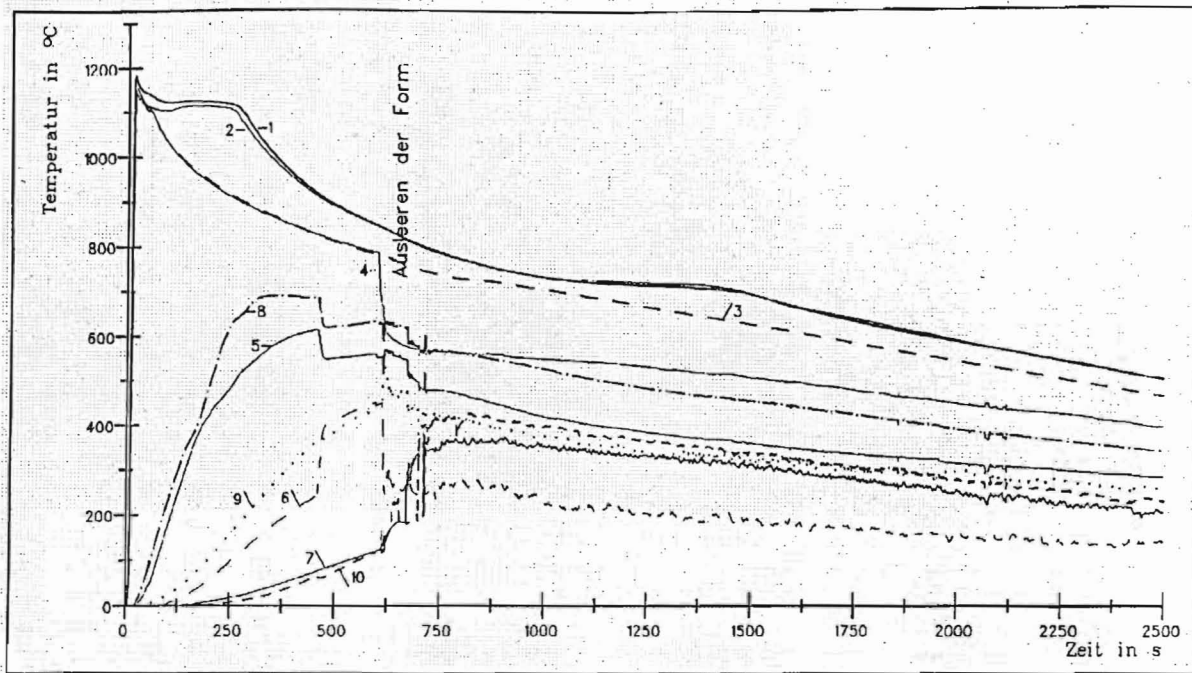


Bild 17. Abkühlung der Schmelze Nr. 22 im Stahlsand, 10 min Verweilzeit

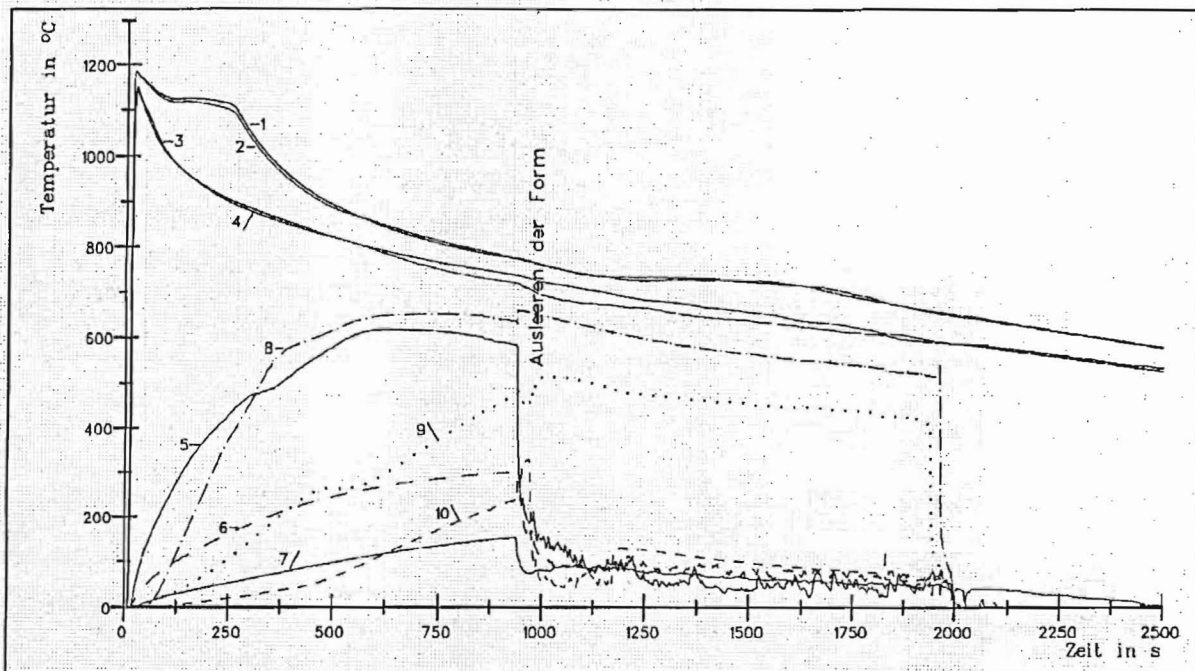


Bild 18. Abkühlung der Schmelze Nr. 21 im Stahlsand, 15 min Verweilzeit

5.5.2.3. Formstoffverhalten

Die Bilder 19 bis 22 zeigen den Temperaturverlauf bei konstanter Verweilzeit und unterschiedlicher Formstoffmischung des Stahlsandes und dem Quarzsand zu verschiedenen Zeitpunkten.

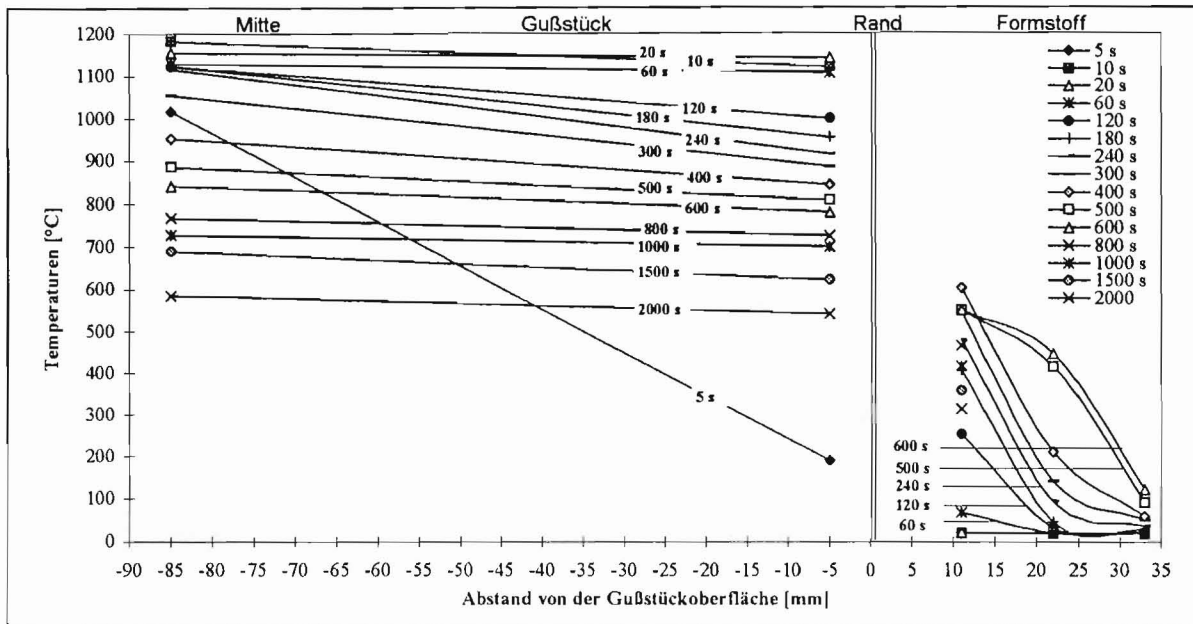


Bild 19. Temperaturverlauf über die Zeit, Schmelze 22, 10 min Verweilzeit, Stahlsand Mischung M2

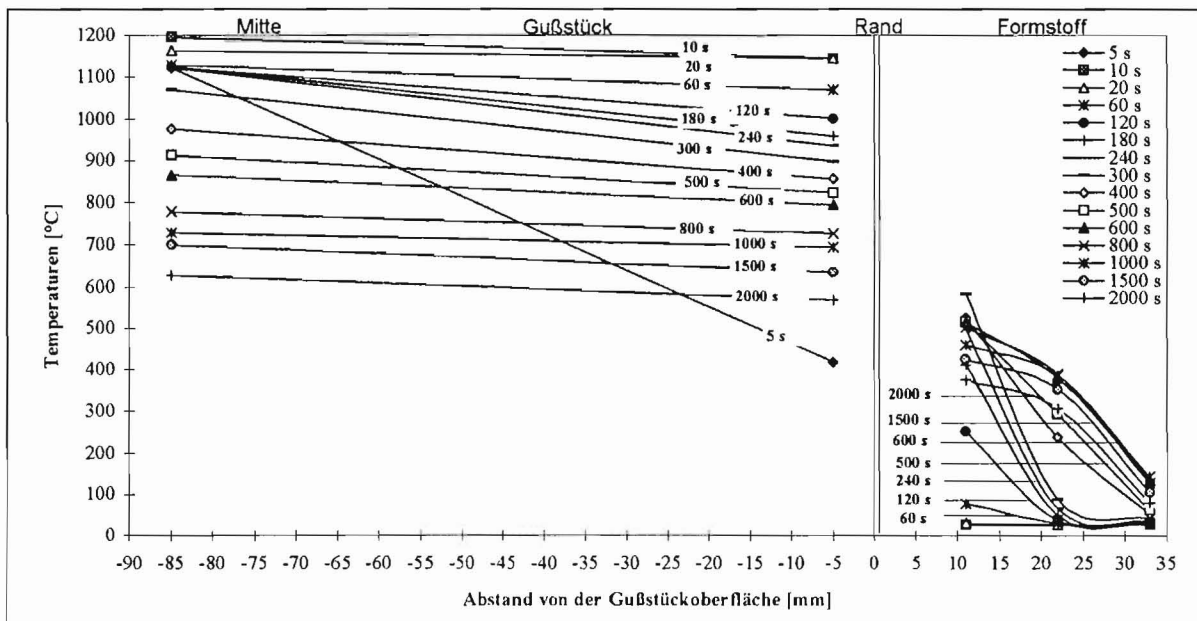


Bild 20. Temperaturverlauf über die Zeit, Schmelze 27, 10 min Verweilzeit, Stahlsandmischung M3

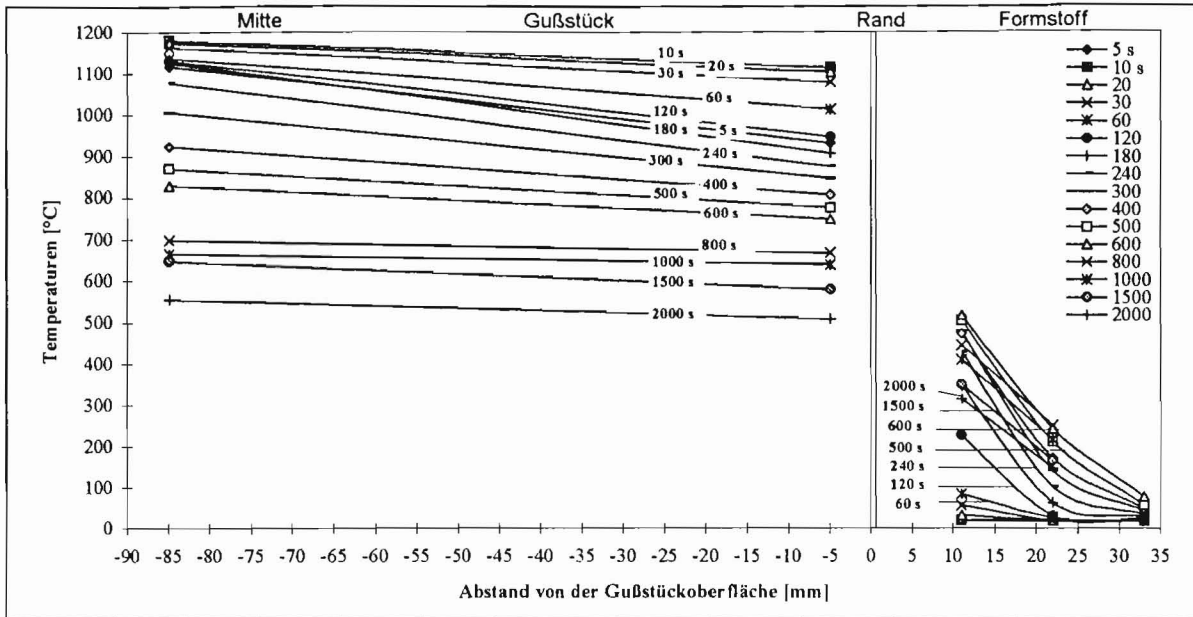


Bild 21. Temperaturverlauf über die Zeit, Schmelze 29, 10 min Verweilzeit, Stahlsandmischung M1

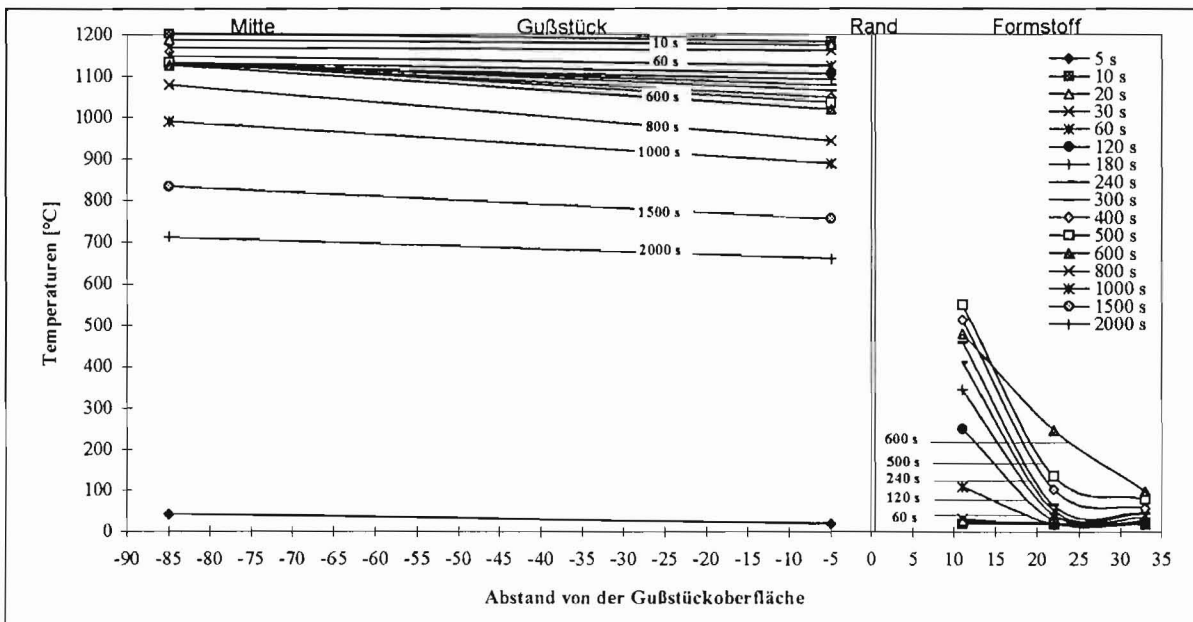


Bild 22. Temperaturverlauf über die Zeit, Schmelze 33, 10 min Verweilzeit, Quarzsand

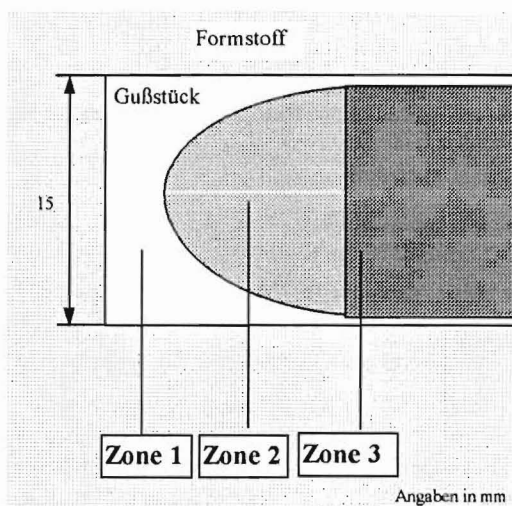
Bei niedrigen Schüttgewichten des Stahlsandes ist nach ca. 600 s der Formstoff in einem breiten Bereich stark aufgeheizt. Die Temperatur im Formstoff nimmt aber nach ca. 22 mm Abstand von der Oberfläche des Gußstückes erheblich ab. Bei hohen Schüttgewichten liegt nach einer Aufheizphase des Formstoffes eine lineare

res Temperaturprofil vor, ähnlich dem des Quarzsandes. Umgekehrt proportional ist das Profil dagegen bei niedrigeren Schüttgewichten.

Für Stahlsand sind folgende Eigenschaften festzuhalten:

- Zu Beginn schnelle Aufheizung und damit schnelle Abkühlung der Schmelze, hohe Speicherfähigkeit der Wärme.
- Die Abgabe der Wärme aus dem Formstoff an die äußere Umgebung erfolgt mit abnehmend Schüttgewichten langsamer.
- Bei niedrigen Schüttgewichten des Stahlsandes ist die Wärmeabgabe aus dem Formstoff niedriger als im Quarzsand und auch niedriger als bei Ausleerung aus der Form und anschließender Luftabkühlung.

5.6. Metallographische Untersuchungen



Für die metallographische Untersuchung wurden Rand- und Mittelproben möglichst weit vom Eingußtrichter entfernt entnommen. Bei den Randproben der Gußstücke sind Bereiche unterschiedlicher Wärmebeeinflussung zu finden. Neben einer Zone, die durch die angrenzende Formstoffwand direkt durch den Formstoff beeinflusst wird (Bild 23, Zone 1) befindet sich eine Zone 2, die zuerst nach den Formstoffbedingungen erstarrt, später durch Erwärmung aus der noch heißen Mitte des Gußstückes (Zone 3) wieder beeinflusst wird.

Bild 23. Gefügebereiche bei den Randproben (schematisch).
Querschnitt durch die 15 mm dicke Gußplatte.

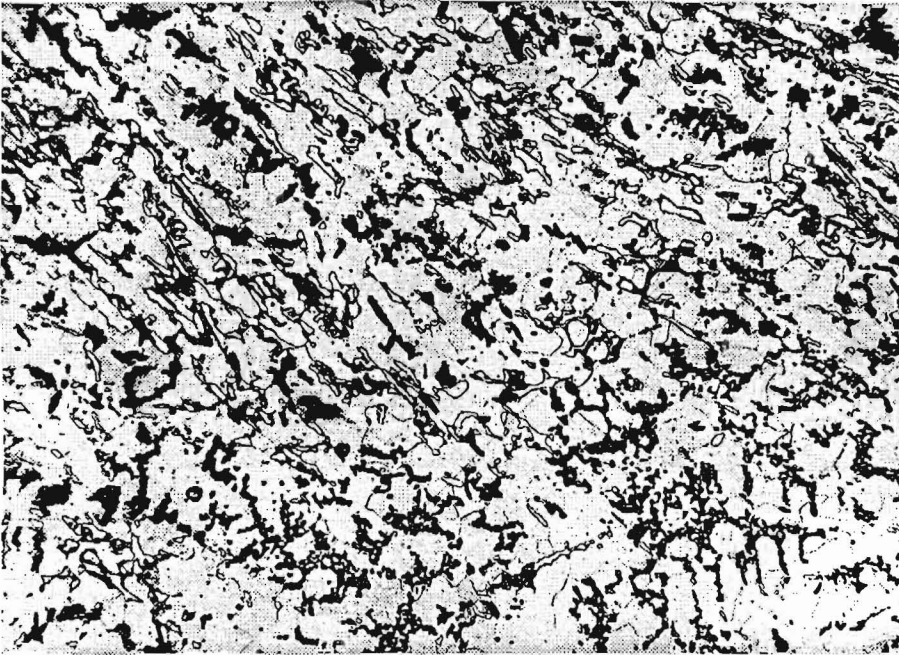


Bild 24. Weißerstartetes Gefüge mit Anteilen an primär ausgeschiedenem Graphit im Übergangsbereich Rand - Mitte einer Gußstückprobe

In Zone 1 erstarrt das Gefüge weiß. Der Übergang zu Zone 2 ist meliert erstarrt (Bild 64). Zone 2 ist durch sehr feinen D-Graphit in einer ferritischen Matrix gekennzeichnet, welche charakteristisch für Kokillenguß ist.

Bild 25 zeigt die Gefügebildung am Rand, Bild 26 in der Mitte. Deutlich ist die Wirkung der größeren Abkühlungsgeschwindigkeit bei zunehmendem Schüttgewicht der Stahlsandmischungen an der feinen Ausbildung des Graphits zu erkennen.

Die Perlitbildung wird bei Mischung M1 und 5 min Haltezeit ganz unterbunden. Sie nimmt mit niedrigerem Schüttgewicht (M3) zu. Der Perlit zerfällt bei Mischung (M2) bereits zu Graphit und Ferrit. Dies ist an den Ferrithöfen erkennbar. Mit zunehmender Verweilzeit zerfällt der Perlit bei allen Formstoffmischungen des Stahlsandes sowie dem Quarzsand. Besonders in der Mitte der Gußstücke. Auch hier ist erkennbar, daß mit längerer Verweilzeit der Gußstücke in der Form nach der Erstarrung die Abkühlungsgeschwindigkeit im Stahlsand kleiner als die im Quarzsand ist. Die Wärme wird nur langsam wieder abgegeben und entsprechend lange besteht der Einfluß hoher Temperaturen auf das Gefüge.

Eine Ausnahme in der Gefügebildung ist die Probe der Mischung M1, 5 min. Zu Mischung M1, 10 min Verweilzeit hat sich kein Graphit und Perlit sondern nur Graphit und Ferrit gebildet. Die Ferritbildung ist durch die Diffusion des Kohlenstoffs aus dem Austenit an die feinen Graphitlamellen des D-Graphits zu erklären /5/. Die Perlitbildung bei längerer Verweilzeit aber gleichen Erstarrungsbedingungen gegenüber den anderen Proben kann durch wieder vorhandenen Kohlenstoff im Austenit und der anschließenden eutektoiden Umwandlung entstehen. Die genaue Ursache der erneuten Verfügbarkeit des Kohlenstoffs ist nicht abschließend zu klären. E. Piwowarsky /6/ geht von Silicocarbiden die α - Ferrit bilden oder von Clustern aus Graphit und an Kohlenstoff ungesättigtem Austenit aus.

Der Austenit ist in der Lage durch Diffusion wieder Kohlenstoff aufzunehmen und bei der anschließenden eutektoiden Umwandlung Perlit zu bilden.


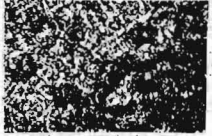


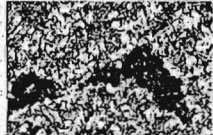

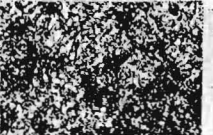
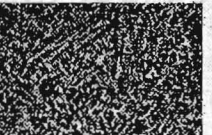




Mischung	Quarzsand	M 2	M 3	M 1
Volumenausfüllung	52 %	53 %	55 %	59 %
Schüttgewicht[g/cm ³]	1,50	4,20	4,29	4,63
Verweilzeit				
5 min				
10 min				
15 min				
5 min	Nr. 34 C% = 3,31 Si% = 2,55 P% = 0,06 Sc = 0,91 t _v [min] = 4,83	Nr. 23 C% = 3,49 Si% = 2,47 P% = 0,06 Sc = 0,96 t _v [min] = 4,83	Nr. 28 C% = 3,08 Si% = 2,15 P% = 0,06 Sc = 0,83 t _v [min] = 5,67	Nr. 35 C% = 3,35 Si% = 2,40 P% = 0,06 Sc = 0,91 t _v [min] = 4,97
10 min	Nr. 33 C% = 3,32 Si% = 2,51 P% = 0,06 Sc = 0,91 t _v [min] = 9,83	Nr. 22 C% = 3,39 Si% = 2,41 P% = 0,06 Sc = 0,92 t _v [min] = 9,83	Nr. 27 C% = 3,48 Si% = 2,44 P% = 0,66 Sc = 0,95 t _v [min] = 10,00	Nr. 29 C% = 3,30 Si% = 2,15 P% = 0,06 Sc = 0,88 t _v [min] = 9,92
15 min	Nr. 32 C% = 3,28 Si% = 2,36 P% = 0,06 Sc = 0,89 t _v [min] = 14,75	Nr. 21 C% = 3,43 Si% = 2,35 P% = 0,06 Sc = 0,93 t _v [min] = 15,25	Nr. 26 C% = 3,43 Si% = 2,43 P% = 0,06 Sc = 0,94 t _v [min] = 14,58	Nr. 18 C% = 3,15 Si% = 2,48 P% = 0,03 Sc = 0,86 t _v [min] = 15,00

Bild 25. Schmelzen in der Reihenfolge ihrer Stahlsand-Schüttgewichte und der Verweilzeit im Vergleich zu Quarzsand. Mittelproben, geätzt mit 3 %iger alk. HNO₃.











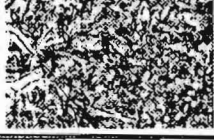

Mischung	Quarzsand	M 2	M 3	M 1
Volumenausfüllung	52 %	53 %	55 %	59 %
Schüttgewicht [g/cm ³]	1,50	4,20	4,29	4,63
Verweilzeit				
5 min				
10 min				
15 min				
5 min	Nr. 34 C% = 3,31 Si% = 2,55 P% = 0,06 Sc = 0,91 t _v [min] = 4,83	Nr. 23 C% = 3,49 Si% = 2,47 P% = 0,06 Sc = 0,96 t _v [min] = 4,83	Nr. 28 C% = 3,08 Si% = 2,15 P% = 0,06 Sc = 0,83 t _v [min] = 5,67	Nr. 35 C% = 3,35 Si% = 2,40 P% = 0,06 Sc = 0,91 t _v [min] = 4,97
10 min	Nr. 33 C% = 3,32 Si% = 2,51 P% = 0,06 Sc = 0,91 t _v [min] = 9,83	Nr. 22 C% = 3,39 Si% = 2,41 P% = 0,06 Sc = 0,92 t _v [min] = 9,83	Nr. 27 C% = 3,48 Si% = 2,44 P% = 0,66 Sc = 0,95 t _v [min] = 10,00	Nr. 29 C% = 3,30 Si% = 2,15 P% = 0,06 Sc = 0,88 t _v [min] = 9,92
15 min	Nr. 32 C% = 3,28 Si% = 2,36 P% = 0,06 Sc = 0,89 t _v [min] = 14,75	Nr. 21 C% = 3,43 Si% = 2,35 P% = 0,06 Sc = 0,93 t _v [min] = 15,25	Nr. 26 C% = 3,43 Si% = 2,43 P% = 0,06 Sc = 0,94 t _v [min] = 14,58	Nr. 18 C% = 3,15 Si% = 2,48 P% = 0,03 Sc = 0,86 t _v [min] = 15,00

Bild 26. Schmelzen in der Reihenfolge ihrer Stahlsand-Schüttgewichte und der Verweilzeit im Vergleich zum Quarzsand. Mittelproben, geätzt mit 3%iger alk. HNO₃

6. Vorteile des Verfahrens aus umwelttechnischer Sicht.

Organische Stoffe werden im Vakuum-Formverfahren nur durch die Folie, die direkt mit der Schmelze in Kontakt kommt in den Stahlsand eingetragen. Die äußere Folie unterliegt dagegen keinen hohen thermischen oder technologischen Belastung. Hier sind günstige, leicht recyclebare Folien einsetzbar. Für den Formhohlraum werden Vinylacetatfolien in einer Dicke von 0,075 mm benötigt.

Der durch die Folie verunreinigte Modellsand bildet eine Schale um die Gußstücke. Eine Trennung unbelasteten Sandes vom Belasteten ist einfach. Gegenüber herkömmlichen ton- oder kunstharzgebundenen Sanden sind die aufzuarbeitenden Mengen gering. Desweiteren muß nicht wie bei den anderen Verfahren der gesamte Sand gereinigt und aufgearbeitet werden.

Die verwendete Schlichte ist durch den überwiegend keramischen Aufbau weitgehend unbedenklich.

Vorteile des Verfahrens sind reduzierter Energie-, Bearbeitungs- und Materialaufwand gegenüber Dauerformen (Kokillen) und geringere Emissionen, geringerer Energie- und Aufarbeitungsaufwand der Formstoffe ton- oder kunstharzgebundener Verfahren. Stahlsand ist im ungünstigsten Fall leicht dem Recyclingprozess als Kreislaufmaterial hinzuzufügen. Durch die hohen Schmelztemperaturen des Stahlsandes ist eine umweltgerechte Entsorgung organischer Bestandteile möglich. Die Deponierung von Restbestandteilen entfällt.

7. Fazit

Die Verwendung von Stahlsand im Vakuum-Formverfahren ist möglich. Die Oberflächengüte wird durch Schichten und spezielle Sandeigenschaften gesichert.

Als weitere Aufgaben zur Optimierung des Verfahrens sind zu nennen:

- Untersuchungen zum Recycling der belasteten Formstoffschale
- Verhalten des Kreislaufsandes bei längerer Nutzung
- Verbesserung des schichtweisen Sandaufbaus
- Untersuchung zu Voraussagen der Abkühlungseigenschaften verschiedener Stahlsandmischungen

Für eine Großserienfertigung ist das Vakuum-Formverfahren zu Zeit noch zu aufwendig. Für spezielle Anwendungen und besondere Anforderungen an ein Gußteil ist die Einsatz in der Praxis bereits erfolgreich verlaufen. Stahlsand als Formstoff erweitert die Möglichkeiten um Eigenschaften von Gußstücken gezielter einzustellen.

8. Schrifttum

- /1/ Schneider, P.:
Das Vakuumformverfahren - Herstellung von Formen mit binderfreiem Sand
Gießerei 60 (1973), Nr. 21, S. 661-669
- /2/ Kubo, Y.; Nakata, K.; Gouwens, P.R.:
Formherstellung mit binderfreiem Sand und Vakuum - Das Vakuumformverfahren
Giessereipraxis 1974, Nr. 23, S. 455-473
- /3/ Brunhuber, E, (Herausgeber):
Gießerei-Lexikon
Verlag Schiele & Schön, 15. Aufl., Berlin 1991, S. 1118-1122
- /4/ Miura, T.:
Druckfestigkeit und Packungsdichte des Sandes beim Vakuum-Formverfahren
Giesserei 63 (1976), Nr. 5, S. 101-105
- /5/ Lampic, M.:
Es lebe Laplace! Zur Abschätzung des Gußeisengefüges anhand von Gefügediagrammen
Giesserei 77 (1990), Nr. 5 S. 161-164
- /6/ Piwowarsky, E. (Herausgeber):
Gußeisen
Zweite Auflage Springer Verlag Berlin 1961, S. 70

Tafel 1. Vakuumwerte und Formstoffdaten der ersten Versuchsserie

Schmelze Nr	Vakuumwerte [bar]				Form-sand	Metallische Formstoffmischung	
	Pumpe	Formhälfte				grob ca. 0,7 bis 1,0 mm ∅	fein ca. 0,16 bis 0,30 mm ∅
		Vor dem Versuch	Beim Abguß	bei der Abkühlung			
0	0,4/0,7	0,4/0,7	0,4	0,1/0,2	100		
Ver1	0,4/0,7	0,4/0,7	0,3	0,1/0,2	100		
Ver2	0,4/0,7	0,4/0,7	0,3	0,1/0,2		75	25

Tafel 2. Versuchsprotokoll der ersten Abgüsse

Schmelze Nr.	Druck	Abgußtemperatur	Impfmittel	Bemerkung
Ver1	0,30 vor 0,15 nach dem Abguss	1390 °C Pfanne 1360 °C Gießtemp.	FeSi 75	Pumpendruck 0,2 bar Korngröße 0,1-1,0 mm Formkasten sackt bis zu 15 % Pfannentemperatur 1400°C-1370°C Folie beidseitig geschlichtet Quarzsand
Ver2	0,3 vor	1400°C Abguss 1370 - 1400 °C Gießtemperatur	FeSi 75	Korngröße 0,2-1,0 mm Stahlsandverhältnis 75/25 zusammengebackener Stahlsand Schichten beidseitig Oberfläche sehr schlecht Abkühlung in der Form muß verringert werden

Tafel 3. Chemische Zusammensetzung der ersten Versuchsserie

Schmelze Nr.	Spektralanalyse [%] ¹⁾					CEL ²⁾	Sc ³⁾
	C	Si	Mn	P	S		
0	3,44	1,56	0,41	0,10	0,09	3,99	0,89
1	3,42	1,49	0,38	0,11	0,07	3,95	0,88
2	3,44	1,53	0,41	0,11	0,07	3,99	0,89
3	Durchbruch der Gießform						
4	3,52	1,63	0,42	0,12	0,07	4,10	0,92
5	3,52	1,54	0,36	0,10	0,24	4,07	0,91
6	3,54	1,63	0,42	0,11	0,06	4,12	0,92
7	3,52	1,47	0,31	0,10	0,07	4,04	0,91
8	3,59	1,63	0,35	0,12	0,07	4,17	0,94
9	3,53	1,77	0,39	0,12	0,07	4,16	0,93
10	3,58	1,73	0,41	0,12	0,06	4,20	0,94
11	3,55	1,72	0,36	0,12	0,06	4,16	0,93
12	3,62	1,61	0,37	0,12	0,06	4,20	0,94
13	3,29	1,61	0,30	0,08	0,13	3,85	0,85
14	Durchbruch der Gießform						

¹⁾ Sonstige Elemente:

Cr < 0,09 %

Mo < 0,02 %

Ni < 0,05 %

Ti < 0,016 %

Mg < 0,005 %

Cu < 0,26 %

²⁾ CEL = % C + 1/3 (% Si + % P)

³⁾ Sc = $\frac{\% \text{ C gem}}{4,3 - (0,25 \% \text{ Si} + 0,5 \% \text{ P})}$

Tafel 4. Analysenwerte der Schmelzen der zweiten und dritten Versuchsserie

Schmelze Nr.	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	CE	Sc
13	3,29	1,61	0,30	0,08	0,13	0,22	3,85	0,85
14	Durchbruch der Gießform							
15	3,10	2,29	0,35	0,12	0,14	0,23	3,90	0,85
16	3,07	2,30	0,30	0,12	0,14	0,25	3,88	0,84
17	3,21	2,36	0,37	0,08	0,14	0,25	4,02	0,87
18	3,15	2,48	0,13	0,03	0,04	0,07	3,99	0,86
19	3,14	2,26	0,12	0,04	0,04	0,08	3,91	0,85
20	3,31	2,18	0,09	0,06	0,07	0,03	4,06	0,89
21	3,43	2,35	0,08	0,06	0,03	0,03	4,23	0,93
22	3,39	2,41	0,09	0,06	0,04	0,04	4,21	0,92
23	3,49	2,47	0,11	0,06	0,04	0,03	4,33	0,96
24	3,55	2,66	0,13	0,06	0,03	0,03	4,46	0,98
25	3,39	2,58	0,10	0,06	0,03	0,03	4,27	0,94
26	3,43	2,43	0,11	0,06	0,03	0,03	4,26	0,94
27	3,48	2,44	0,13	0,06	0,03	0,03	4,31	0,95
28	3,08	2,15	0,09	0,06	0,03	0,03	3,82	0,83
29	3,30	2,15	0,08	0,06	0,02	0,03	4,04	0,88
30	3,42	2,45	0,10	0,06	0,02	0,03	4,26	0,94
31	3,25	2,54	0,07	0,06	0,03	0,03	4,12	0,89
32	3,28	2,36	0,06	0,06	0,02	0,02	4,09	0,89
33	3,32	2,51	0,06	0,06	0,02	0,02	4,18	0,91
34	3,31	2,55	0,06	0,06	0,02	0,02	4,18	0,91
35	3,35	2,40	0,05	0,06	0,03	0,03	4,17	0,91

Tafel 5. Zusammensetzung der verwendeten Impfmittel

Impfmittel	Fe [%]	Si [%]	Al [%]	Cu [%]	Ca [%]	Ba [%]	Bemerkung
FeSi 75	Rest	75-80	1,2-2,0	-	0,3-1,2	-	bis 0,30 Ti
Inobar (FeSiBa)	Rest	60/65	1,3/1,7	0,5/1,5	-	9/11	Körnung 0,5/5 bis 0,5/7 in mm

Tafel 6. Nach VDG-Vorschrift P 27 ermittelte Sandparameter

Schmelze Nr.	S _{th}	Mk _{calc}	ASF-Kornfeinheitsnr.
15	20	0,26	11,42
16	15	0,32	8,47
17	15	0,32	8,80
18	15	0,33	8,27
19	15	0,32	8,26
20	15	0,32	8,64
21	21	0,25	12,04
22	21	0,25	11,94
23	22	0,25	12,37
24	30	0,17	16,83
25	29	0,17	16,35
26	29	0,17	16,70
27 ¹⁾	29	0,17	16,60
28	30	0,16	16,95
29 ¹⁾	15	0,32	8,39
30 ¹⁾	15	0,32	8,39
31	28	0,18	16,16
32 ²⁾	91	0,26	52
33 ²⁾	91	0,26	52
34 ²⁾	91	0,26	52
35 ¹⁾	15	0,32	8,39

¹⁾ Für die Schmelzen Nr. 27, 29, 30, 35 liegen keine Siebanalysen des beim Abguß verwendeten Sandes vor. Aufgrund der geringen Streubreite der ermittelten Sandkennwerte werden für diese Proben Mittelwerte der entsprechenden Sandmischung in der Einstufung laut den Aufzeichnungen bestimmt.

²⁾ Für Quarzsand aus den technischen Informationsblättern ermittelt.

Tafel 7. Einstufung der Schmelzen aufgrund der Siebanalysen und Sandparameter in die entsprechende Mischungsklasse

Mischung Nr.	Schmelze Nr
M 1 und FeSi 75 als Impfmittel	16 17
M 2 und FeSi 75 als Impfmittel	15

Mischung Nr.	Schmelze Nr
M 1 und INOBAR als Impfmittel	18 19 20 29 30 35
M 2 und INOBAR als Impfmittel	21 22 23
M 3 und INOBAR als Impfmittel	24 25 26 27 28 31
Quarzsand	32 33 34

Tafel 8. Verwendete Mischungsverhältnisse zwischen Fein- und Grobsand und ermittelte Schüttgewichte

Formstoff	feiner Sand [%]	grober Sand [%]	Schüttgewicht ρ [g/cm ³]
M1	26,6	73,4	4,63
M2	41,0	59,0	4,20
M3	66,5	33,5	4,29

Tafel 9. Beispiel der Auswertung von Schlichtedicke, Oberflächenfehler und Bewertung der Verweilzeit 5, 10, 15 Minuten; Impfmittel FeSi 75

Nr	Unterdruck [bar]	Verweilzeit [min]	Formstoff	Anzahl der Schichten	Anzahl laut Messung	Durchschnitt der Schlichtedicke [mm]	Oberflächenqualitätsbeurteilung ¹⁾	Auftretende Fehlerart ²⁾
17	0,45	5	M1	1	1	0,049	4	S
				2	2	0,075	3	
				3	3	0,091	3	
				4	4	0,126	1,5	
15	0,35	10	M2	1	1	0,058	3	keine Werte
				2	2	0,097	4	
				3	3	0,116	3	
				4	4	0,132	2	
16	0,60	15	M1	1	2	0,098	2	B
				2	3	0,134	3	
				3	1	0,048	4	
				4	4	0,149	5	

Legende Tafel 9

¹⁾ Einschätzung der Noten: 1 - sehr gut ... 6 - ungenügend

²⁾ B	Blasen		
S	Schülpen	ohne Punkt	gering
Pen	Penetration	viele Punkte sehr stark.

Tafeln der wichtigsten metallographischen Untersuchungen

Tafel 10. Metallographische Untersuchung bei 5 min Verweilzeit; Impfmittel Inobar

Schmelze Nr.	23	28	35
Formstoff	M 2	M 3	M 1
Schüttgewicht [g/cm ³]	4,20	4,29	4,63
Verweilzeit [min]	4,83	5,67	4,97
Erstarrungszeit [min]	3,5	3,73	3,63
Unterdruck [bar]	0,35	0,36	0,35
Dicke Schlichteschicht auf der Seite der Thermolemente im Formstoff [mm]	0,197	0,194	0,208
Chemische Zusammensetzung			
C [%]	3,49	3,08	3,35
Si [%]	2,47	2,15	2,40
P [%]	0,06	0,06	0,06
CE-Wert	4,33	3,82	4,17
Sc- Wert	0,96	0,83	0,91
Graphitusbildung (nach VDG Merkblatt P441)			
Randproben			
Rand	III D 6	III E 6	III D 7/8
Randbereich	I D 3	I B/C 4	III D 5
Übergang	I A 3	I A 3/4	III D 3/4
Mittelproben			
Rand	III A 4	III A 4	III E 5
Randbereich	III A 3	III A 3	I A 3/4
Mitte	I A 2/3	I A 2/3	IV/I A 2/3
Perlitanteil			
Randproben	von 20 % schnell auf 100 % ansteigend, andere Seite ohne Übergang 100 % Perlit	von 20 % langsam auf 100 % übergehend	kein Perlit
Mittelproben Rand	80-90 %	60 %	< 10 %
Mittelprobe Mitte	60 %	40 %	max. 10 %
Weißbeinstrahlung			
Weißbeinstrahlung an den Ecken der Randprobe	nein	gering	reicht weit in das Gußstück hinein
Oberflächenfehler			
Oberflächenfehler bei angegebener Schlichtedicke	keine	Blasen	Blasen

Tafel 11. Metallographische Untersuchung bei 10 min Verweilzeit; Impfmittel Inobar

Schmelze Nr.	22	27	29
Formstoff	M 2	M 3	M 1
Schüttgewicht [g/cm ³]	4,20	4,29	4,63
Verweilzeit [min]	9,83	10,00	9,92
Erstarrungszeit [min]	3,52	3,47	3,23
Unterdruck [bar]	0,35	0,35	0,36
Dicke Schlichteschicht auf der Seite der Thermoelemente im Formstoff [mm]	0,196	0,191	0,199
Chemische Zusammensetzung			
C [%]	3,39	3,48	3,30
Si [%]	2,41	2,44	2,15
P [%]	0,06	0,06	0,06
CE-Wert	4,21	4,31	4,04
Sc- Wert	0,92	0,95	0,88
Graphitusbildung (nach VDG Merkblatt P441)			
Randproben			
Rand	III D 5	I D 4	III D 6
Randbereich	I D 4	I D 4/5	I D 5
Übergang	I A 3/4	I A 3	I D 4
Mittelproben			
Rand	III A 4	I A/B 4	I E 4
Randbereich	I A 3	I A 4	I A 3/4
Mitte	I A 2	I A 3/2	I A 3
Perlitanteil			
Randproben	20 % beginnend, schnell auf 100 % ansteigend	< 10 %	< 10 %
Mittelproben Rand	von 60 % schnell auf 100 ansteigend, bzw. sofort am Rand mit 100 % beginnend	von 5 % langsam zunehmend auf 90 - 100 %	von 10 % langsam auf 100 % zunehmend
Mittelproben Mitte	50 %	70 %	100 % Ferrithöfe
Weißeinstrahlung an den Ecken der Randprobe	nein	nein	geringe Weißeinstrahlung
Oberflächenfehler bei angegebener Schlichtedicke	keine	keine	keine

Tafel 12. Metallographische Untersuchung bei 15 min Verweilzeit; Impfmittel Inobar

Schmelze Nr.	21	26	18
Formstoff	M 2	M 3	M 1
Schüttgewicht [g/cm ³]	4,20	4,29	4,63
Verweilzeit [min]	15,25	14,58	15,00
Erstarrungszeit [min]	3,47	3,33	3,10
Unterdruck [bar]	0,35	0,35	0,32
Dicke Schlichteschicht auf der Seite der Thermoelemente im Formstoff [mm]	0,149	0,207	0,153
Chemische Zusammensetzung			
C [%]	3,43	3,43	3,15
Si [%]	2,35	2,43	2,48
P [%]	0,06	0,06	0,03
CE-Wert	4,23	4,26	3,99
Sc- Wert	0,93	0,94	0,86
Graphitausbildung (nach VDG Merkblatt P441)			
Randproben			
Rand	III E 5	I E 4/5	I D/E 4/5
Randbereich	I D 4	I A 3/4	I D 4 (3)
Übergang	I A 3	I A 4	I A 3
Mittelproben			
Rand	I A 4	I D 3/4	I A/D 4
Randbereich	I D 3/4	I B 3/4	I A 3/4
Mitte	I A 1/2	I A 2/3	I A 2/3
Perlitanteil			
Randproben	von 50 % schnell auf 100 % % übergehend	von 30 % auf 100 % ansteigend	30 %
Mittelproben Rand	10 %	80 %	100 % mit Ferrithöfen
Mittelproben Mitte	von 40 % auf 100 % zunehmend, bzw. sofort 100 %	30 % langsam auf 100 % zunehmend	10 bis 30 % langsam auf 100 % zunehmend
Weißstrahlung			
Weißstrahlung an den Ecken der Randprobe	keine	keine	gering
Oberflächenfehler bei angegebener Schlichtedicke	keine	Blasen	keine

Tafel 13. Parameter und Einstellungen der in Quarzsand gegossenen Proben Nr. 32, 33 und 34 in Abhängigkeit von der Verweilzeit

Schmelze Nr.	34	33	32
Formstoff	Quarzsand	Quarzsand	Quarzsand
Schüttgewicht [g/cm ³]	1,48-1,55	1,48-1,55	1,48-1,55
Verweilzeit [min]	4,83	9,83	14,75
Erstarrungszeit [min]	11,08	9,58	12,00
Unterdruck [bar]	0,35	0,35	0,35
Dicke Schlichteschicht auf der Seite der Thermoelemente im Formstoff [mm]	0,196	0,197	0,189
Chemische Zusammensetzung			
C [%]	3,31	3,32	3,28
Si [%]	2,55	2,51	2,36
P [%]	0,06	0,06	0,06
CE-Wert	4,18	4,18	4,09
Sc- Wert	0,91	0,91	0,89
Graphitusbildung (nach VDG Merkblatt P441)			
Randproben			
Rand	I E 4-5 an der Ecke I B 4	I A 4-5 an der Ecke I A/B 4	I A 4 in der Ecke I A 3-4
Randbereich	I A 3-4	I A 3	I A 3
Übergang	I A 3	I A 3	I A 2-3
Mittelproben			
Rand	IV A 3	I A 3	I A 3
Randbereich	I B 2	I B 2	I B 2
Mitte	I A 1-2	I A 1	I A 1
Perlitanteil			
Randproben	5 % Perlit, langsam auf 100 % ansteigend	von 40 % auf 100 % zunehmend	von 10 % sehr langsam zu max. 100 % übergehend
Mittelproben Rand	20 %-100 %, bzw.	20 %	10 %
Mittelproben Mitte	70 %	70 % mit Ferrithöfen	100 % mit Ferrithöfen
Oberflächenfehler			
Oberflächenfehler	Blasen	Penetration	keine
Sonstiges	TiC, TiN, Kugelgraphit, evtl. Mn, Phosphideutektikum	hoher Schwefelanteil MnS in der Restschmelze	auch Kugelgraphit in der Mitte