

Arbeitsbereich Fertigung und Umwelttechnik des  
Instituts für Gießereitechnik gGmbH - Düsseldorf

**Entwicklung eines betriebstauglichen Systems zur  
prozessintegrierten thermischen Reinigung von  
Schadstoff und Geruchsstoff beladenen Gießgasen -  
Integrierte Gießgasverbrennung**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 26077 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. rer. nat. Guido Furth  
B.E. André Lötschert

Mai 2010

# Projektkennblatt

der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	<b>26077</b>	Referat	<b>21/2</b>	Fördersumme	<b>169.000,00 €</b>
----	--------------	---------	-------------	-------------	---------------------

**Antragstitel**                      **Entwicklung eines betriebstauglichen Systems zur prozessintegrierten thermischen Reinigung von Schadstoff und Geruchsstoff beladenen Gießgasen**

## Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>24 Monate</b>	<b>13.11.2007</b>	<b>28.02.2010</b>	
Zwischenberichte	30.07.2008	30.01.2009	30.07.2009

<b>Bewilligungsempfänger</b>	IfG – Institut für Gießereitechnik gGmbH Sohnstr. 70 40237 Düsseldorf	Tel	0211 6871-262
		Fax	0211 6871-216
		Projektleitung	Dr. rer. nat. G. Furth
		Bearbeiter	Dr. rer. nat. G. Furth

## Kooperationspartner

### *Zielsetzung und Anlass des Vorhabens*

Gießereien sind Hersteller von anspruchsvollen Bauteilen für die Industriesektoren Fahrzeugbau, Maschinenbau und andere Branchen. In Deutschland fertigen etwa 400 Gießereien mit etwa 50.000 Beschäftigten mit dieser Technik. Beim Gießen des flüssigen Metalls in die Formen werden von der eingebrachten Wärme die Kunstharze und der Kohlenstaub unter reduzierenden Bedingungen zu Gießgasen mit Schadstoffen, wie Benzol oder Toluol, sowie mit geruchsintensiven Stoffen, wie Xylol, methylierte Naphthaline oder Indole umgesetzt. Es gibt keine befriedigende technische Maßnahme, um derartige Gießgase zu erfassen und zu reinigen. Die Gießgase führen somit zu erheblichen Belastungen der Umwelt sowie an den Arbeitsplätzen in den Gießereien. Im geplanten Vorhaben soll eine integrierte Gießgasverbrennung entwickelt werden. Es soll ein komplettes System (Einsatzstoffe, Verfahrensschritte etc.) entwickelt werden, das unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine betriebliche Lösung für die Gießereien darstellt.

### *Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden*

Es wurden umfangreiche Gießversuche im IfG-Technikum und in Gießereien durchgeführt, bei denen das Einbringen von verschiedenartigen Zusatzbrennstoffen in den Gießereiprozess entwickelt und erprobt wurden. Mit diesen wurden die Gießgase prozessintegriert verbrannt – und damit Schadstoffe und Geruchsstoffe in den Gießgasen beseitigt.

Arbeitsschritte:

1. Entwicklung und Bewertung von Varianten der integrierten Gießgasverbrennung an Sandformen
2. Einsatz und Entwicklung der Simulationstechnik (Wärmetransport und Temperaturfelder in der Form, Simulation von Gießgasströmungen)
3. Bestimmung des Einflusses von prozessrelevanten Größen auf den Gießgasstrom
4. Integrierte Gießgasverbrennungen an idealisierten Form- und Guss-Geometrien
5. Einsatz von Zusatzbrennstoff an realen Gießereiformen im IfG-Technikum
6. Modellhafte Anwendung der integrierten Gießgasverbrennung in Modellgießereien
7. Entwicklung eines einsatzfertigen Systems der integrierten Gießgasverbrennung

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Im Rahmen des durchgeführten Projektvorhabens wurden Methoden entwickelt, die geeignet sind in Gießereien an stationären sowie an bewegten Formen eine prozessintegrierte Gießgaskonvertierung durchzuführen. Hierzu wurde zunächst die computergestützte Simulationstechnik adaptiert, um eine Prognose der Massenströme in und an der Gussform zu ermöglichen. Die Ergebnisse Decken sich mit den empirisch ermittelten Ergebnissen aus dem Bereich der betriebsnahen Untersuchungen, die im IfG-Technikum durchgeführt wurden. Ein Ergebnis bei diesen Untersuchungen war, dass die Gießgase mit bis zu 96 % überwiegend an der Formstoffoberseite entweichen. Die Prognose bzgl. der Gießgasemissionen führt zu einer Effizienzsteigerung der Gießgaserfassung in der Praxis. Dies bedeutet, dass in diesem Projekt mit Hilfe der Simulationsdaten gezielt Gaserfassungskonzepte entwickelt werden konnten. Unter Berücksichtigung der Vielfältigkeit der Gießereien wurden unterschiedliche Erfassungsmöglichkeiten und Materialien im Bereich der automatisierten Formherstellung sowie im Bereich der stationären Formherstellung mit organischen und anorganischen Bindersystemen eingesetzt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen und der Analyse der Gießgaszusammensetzung zeigten, dass der Einsatz von Zusatzbrennstoffen in der Form nicht zielführend ist, so dass die neuen Konzepte an der Formstoffoberfläche zum Einsatz gebracht werden müssen. Bei den neuen Konzepten handelt es sich um eine Brennkammer, die mit einem Ethanol/Zellulose-Gel betrieben wird, um einen Brenner, der mit einem Propan/Butan-Gasgemisch betrieben wird und um eine Hochspannungszündvorrichtung, mit der die Gießgase gezündet werden können. Die aufgeführten Methoden sind in der Lage mit einem guten Wirkungsgrad die Schadstoffe in den Gießgasen, sofern es sich dabei um Kohlenwasserstoffe handelt, zu CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O zu oxidieren.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Am 29.04.2010 wurde das abgeschlossene Projekt mit all seinen Resultaten in Osnabrück im Rahmen einer Fachtagung ausgesuchtem Fachleuten präsentiert. Des Weiteren sollen die Ergebnisse zu einem späteren Zeitpunkt in der einschlägigen Fachliteratur veröffentlicht werden.

## ***Fazit***

Die in diesem Projektvorhaben entwickelten Maßnahmen zur oxidativen Gießgaskonvertierung verstehen sich, jede für sich genommen, als Teil eines Maßnahmenpakets, welches im Bedarfsfall geschnürt werden kann. Jede dieser Methoden ist in der Lage die Gießgasemission zu reduzieren. Durch die Kombination der entwickelten Konvertierungsmethoden ist es möglich, für nahezu jeden Bedarfsfall eine Lösung zur Reduktion der Gießgasemissionen zu generieren. Dies zeigten Praxistests, welche in den Gießereien durchgeführt wurden. Persönliche Gespräche mit den Gießereibetreibern zeigten darüber hinaus, dass es einen großen Bedarf an flexiblen Methoden zur prozessintegrierten Gießgaskonvertierung, wie sie in diesem Projekt entwickelt wurden, gibt, so dass eine Etablierung der vorliegenden Maßnahmenkonzepte in den Gießereien sehr wahrscheinlich ist.

**I Inhaltsverzeichnis**

<b>I Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>4</b>
<b>II Verzeichnis von Bildern und Tabellen .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Zusammenfassung.....</b>	<b>9</b>
<b>2 Ausgangssituation .....</b>	<b>11</b>
<b>3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projektes .....</b>	<b>13</b>
3.1 Gießgas.....	13
3.1.1 Gießgasbildung.....	13
3.1.2 Gießgasaustritt .....	14
3.2 Gasbehandlung .....	15
3.2.1 Primärmaßnahmen .....	15
3.2.2 Sekundärmaßnahmen .....	16
<b>4 Methoden .....</b>	<b>17</b>
4.1 Grundlegende Versuchsabläufe.....	17
4.1.1 Schmelztechnik.....	17
4.1.2 Formtechnik .....	18
4.1.2.1 Grünsandsystem.....	18
4.1.2.2 Furansandsystem .....	19
4.1.3 Messtechnik.....	20
4.1.3.1 Ermitteln der Messdaten .....	20
4.1.3.2 Versuchsablauf und Aufbau .....	21
4.1.3.3 Datenaufbereitung .....	23
4.2 Erarbeitung spezifischer Methoden .....	25
4.2.1 Gießgaserfassung an der gesamten Form .....	25
4.2.2 Abdeckungen zur gezielten Gießgaserfassung .....	26
4.2.2.1 Holz-Abdeckung.....	26

4.2.2.2	Stahl-Abdeckung.....	26
4.2.2.3	Aluminium(folien)-Abdeckung .....	27
4.2.3	Gießgaserfassung mit Luftpfeifen .....	27
4.2.4	Entwicklung von Konvertierungsmethoden.....	28
4.2.4.1	Gasbrenner zur Nachverbrennung von Gießgasen .....	28
4.2.4.2	"Gießereifeuerzeug" zur Nachverbrennung von Gießgasen.....	28
4.2.4.3	"Brennkammer" zur Nachverbrennung von Gießgasen.....	29
4.2.4.4	"Hochspannungszünder" [HSZ] zur Zündung von Gießgasen.....	30
4.3	Simulation .....	31
4.4	Anwendung der integrierten Maßnahmen in den Gießereien.....	35
<b>5</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>36</b>
5.1	Gießgaserfassung .....	36
5.1.1	Holzeinhausung – Gasfreisetzung nach dem Abguss .....	36
5.1.2	Metalleinhausung.....	36
5.1.2.1	Stahl-Abdeckung.....	37
5.1.2.2	Aluminium(folien)-Abdeckung .....	37
5.1.3	Luftpfeife – Gaserfassung nach dem Abguss .....	37
5.2	Konvertierungsmethoden.....	38
5.2.1	Gasbrenner .....	38
5.2.2	Gießereifeuerzeug .....	39
5.2.3	Brennkammer .....	39
5.2.4	Hochspannungszünder (HSZ) .....	40
5.2.5	Kohlendioxid-Bilanz .....	41
5.3	Simulation .....	41
5.4	Untersuchungen in den Gießereien.....	43
5.4.1	Prüfung und Bewertung der Abgasbehandlungsmethoden durch die Gießereien.....	43

5.4.2	Einsatz der Konvertierungsmethoden in einer Gießerei .....	44
<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>45</b>
6.1	Mögliche Zusatzbrennstoffe in der Form .....	45
6.2	Gießgaserfassung .....	46
6.3	Konvertierungsmethoden.....	47
6.3.1	Gießereifeuerzeug .....	47
6.3.2	Brennkammer .....	48
6.3.3	Hochspannungszünder.....	49
6.3.4	Brenner .....	49
6.4	Prüfung der Verfahren in Gießereien.....	50
<b>7</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>1</b>
	Anhang A – Exemplarisches Versuchsprotokoll.....	1
	Anhang B – Exemplarisches Formstoffprotokoll.....	6
	Anhang C - Simulation.....	10

## II Verzeichnis von Bildern und Tabellen

### Abbildungen

Abbildung 1: Exemplarische Darstellung einer Simulation der Temperaturverteilung in einer Form, fünf Minuten (A) und zwei Stunden (B) nach dem Abguss .....	13
Abbildung 2: Beispiel einer Binderentwicklung.....	15
Abbildung 3: Überblick über VOC-Minderungsmaßnahmen .....	16
Abbildung 4: Einsatzmaterial (links) und Abstich am Induktions-Kippofen (rechts) im IFG-Technikum.....	17
Abbildung 5: Schmelztiegel und Abguss an der Absaugeinrichtung .....	17
Abbildung 6: Skizze der (des) Standardform(kastens) ohne Anguss.....	18
Abbildung 7: Wirbelmischer und exemplarische Abbildung eines Unterkastens mit Kernen .	19
Abbildung 8: Bindersystem mit Harz und Säure.....	19
Abbildung 9: Modellplatten (links) und Verdichten des Furansandes (rechts) .....	20
Abbildung 10: Aktivkohleröhrchen BIA Typ II und Flammenionisationsdetektor (FID).....	20
Abbildung 11: Position der Thermoelemente in der Form und an der Abdeckung.....	21
Abbildung 12: Skizze der Kühlstrecke und der Absaugung .....	22
Abbildung 13: [1] Absaugleitung; [2] FID-Messgerät; [3] Gas-Analyser mit Laptop zur Datenverarbeitung; [4] Messrechner zur Aufnahme der Abkühlkurven, Luftfeuchtigkeit und der FiD-Daten; [5] Gießstrecke mit Kapselung; [6] Pumpe zur Aktivkohlebeladung .....	22
Abbildung 14: Exemplarische Darstellung der Temperaturverläufe in .....	23
Abbildung 15: Vergleich zwischen den Rohdaten (links) und den aufbereiteten Daten (rechts) des Gas-Analysers .....	24
Abbildung 16: Vergleich zwischen den Rohdaten (links) und den aufbereiten Daten (rechts) des FID-Messgeräts .....	24
Abbildung 17: Integration (links) und Extrapolation (rechts) der Messdaten .....	25
Abbildung 18: Versuchsanordnung zur Gasaustrittsbestimmung .....	25
Abbildung 19: Holzabdeckungen zur Erfassung der Gießgase.....	26
Abbildung 20: Abdeckung aus Stahl mit Eingussöffnung .....	26
Abbildung 21: Abdeckung aus einer Aluminiumfolie .....	27

Abbildung 22: Messungen an Luftpfeifen mit unterschiedlicher Geometrie .....	28
Abbildung 23: Nutzung eines Gasbrenners zur Nachverbrennung der Gießgase .....	28
Abbildung 24: Prinzipskizze des Gießereifeuerzeugs .....	29
Abbildung 25: Funktionsprinzip der Brennstoffkammern mit Brenngel .....	29
Abbildung 26: Darstellung eines HSZ-2 und eine allgemeine Prinzipskizze des Hochspannungszünders.....	30
Abbildung 27: Vergleich zweier Simulationen mit und ohne Formfüllung unterschiedlicher Software .....	31
Abbildung 28: Exemplarische Abbildungen von simulierten Formstoffgeometrien .....	34
Abbildung 29: Hochspannungszündvorrichtung in einer Eisengießerei .....	35
Abbildung 30: Skizzen der eingesetzten mobilen Gasbrenner.....	38
Abbildung 31: Simulation der Temperaturfrontausdehnung.....	42
Abbildung 32: Simulation der CO-Diffusion im Formstoff.....	42
Abbildung 33: Simulation der Gasemission am Oberkasten am Beispiel von SO <sub>2</sub> .....	42
Abbildung 34: Schematische Skizze einer automatischen Formanlage mit integrierter Gießgasverbrennung (HSZ), Kühlstrecke und Ausleerstation .....	44
Abbildung 35: Kategorisierung der Zusatzbrennstoffe und der geplante Einsatz in der Form .....	45

## Tabellen

Tabelle 1: Temperaturbereiche und entsprechende Reaktionen .....	14
Tabelle 5: Typische Ergebnisse für furanharz- und bentonithaltige Formstoffsysteeme .....	39
Tabelle 6: Typische Ergebnisse für die Gießgasverbrennung mit dem Zusatzbrennstoff.....	39
Tabelle 7: Typische Ergebnisse für die Gießgasverbrennung mit geliertem Ethanol in einer 40	
Tabelle 8: Exemplarische Wirkungsgrade für die Methode des Hochspannungs-.....	40
Tabelle 9: Kohlendioxid-Bilanz.....	41
Tabelle 10: Resultate der Gießereiuntersuchungen.....	44



# 1 Zusammenfassung

Gießereien sind Hersteller von anspruchsvollen Bauteilen für die Industriesektoren Fahrzeugbau, Maschinenbau und andere Branchen. Eine typische Fertigung ist das Gießen des flüssigen Metalls in Formen aus Sand, der mit einem Gemisch aus Ton, Kohlenstaub oder mit kalthärtenden Harzen zu festen Formen gebunden ist. Beim Gießen des flüssigen Metalls in die Formen werden von der eingebrachten Wärme die Kunstharze und der Kohlenstaub unter reduzierenden Bedingungen zu Gießgasen mit Schadstoffen, wie Benzol oder Toluol, sowie mit geruchsintensiven Stoffen, wie Xylole, methylierte Naphthaline oder Indole. Die Gießgase führen somit zu erheblichen Belastungen der Umwelt sowie an den Arbeitsplätzen in den Gießereien.

Im Rahmen des durchgeführten Projektvorhabens wurden Methoden entwickelt, die geeignet sind in Gießereien an stationären sowie an bewegten Formen eine prozessintegrierte Gießgaskonvertierung durchzuführen. Hierzu wurde zunächst die computergestützte Simulationstechnik adaptiert, um eine Prognose der Massenströme in und an der Gussform zu ermöglichen. Die Ergebnisse decken sich mit den empirisch ermittelten Ergebnissen aus dem Bereich der betriebsnahen Untersuchungen, die im IfG-Technikum durchgeführt wurden. Ein Ergebnis bei diesen Untersuchungen war, dass die Gießgase mit bis zu 96 % überwiegend an der Formstoffoberseite entweichen. Die Prognose bzgl. der Gießgasemissionen führt zu einer Effizienzsteigerung der Gießgaserfassung in der Praxis. Dies bedeutet, dass in diesem Projekt mit Hilfe der Simulationsdaten gezielt Gaserfassungskonzepte entwickelt werden konnten. Unter Berücksichtigung der Vielfältigkeit der Gießereien wurden unterschiedliche Erfassungsmöglichkeiten und Materialien im Bereich der automatisierten Formherstellung sowie im Bereich der stationären Formherstellung mit organischen und anorganischen Bindersystemen eingesetzt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen und der Analyse der Gießgaszusammensetzung zeigten, dass der Einsatz von Zusatzbrennstoffen in der Form nicht zielführend ist, so dass die neuen Konzepte an der Formstoffoberfläche zum Einsatz gebracht werden müssen. Bei den neuen Konzepten handelt es sich um eine Brennkammer, die mit einem Ethanol/Zellulose-Gel betrieben wird, um einen Brenner, der mit einem Propan/Butan-Gasgemisch betrieben wird und um eine Hochspannungszündvorrichtung, mit der die Gießgase gezündet werden können. Die aufgeführten Methoden sind in der Lage mit einem guten Wirkungsgrad die Schadstoffe in den Gießgasen, sofern es sich dabei um Kohlenwasserstoffe handelt, zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  zu oxidieren. Dies zeigten Praxistests, welche in den Gießereien durchgeführt wurden.

Persönliche Gespräche mit den Gießereibetreibern zeigten, dass es einen großen Bedarf an flexiblen Methoden zur prozessintegrierten Gießgaskonvertierung, wie sie in diesem Projekt

entwickelt wurden, gibt, so dass eine Etablierung der vorliegenden Maßnahmenkonzepte in den Gießereien sehr wahrscheinlich ist.

## **2 Ausgangssituation**

In Deutschland produzieren ca. 700 überwiegend mittelständische Gießereien mit ca. 80000 Beschäftigten Gussstücke für den europäischen Markt. Deutschland ist mit Abstand der größte Gussproduzent in Europa. Gießereien sind Zulieferer für viele wichtige Industriezweige – Fahrzeug- und Maschinenbau stehen mengenmäßig im Vordergrund. Gegossen werden beispielsweise Bauteile für Kraftfahrzeuge, wie Zylinderkurbelgehäuse, Zylinderköpfe, Kurbel- oder Nockenwellen, Bremsscheiben, Achsteile u. v. m.. Gussstücke werden als endkonturnahe Bauteile hergestellt, in dem flüssiges Metall, wie Gusseisen- oder Aluminiumschmelzen, in Formen aus Quarzsand und Bindemittel gegossen wird und dort zu einem Bauteil erstarrt.

Diese Bindemittel und weitere Zusatzstoffe zersetzen sich durch die Wärme des flüssigen Metalls teilweise zu Schadstoffen, wie Benzol, Toluol, Schwefeldioxid oder zahlreichen anderen, teilweise stark riechenden Stoffen. Typischerweise verlassen diese Gase die Formen als so genanntes Gießgas. Diese Gießgase können je nach Fertigungsbedingungen nur unzureichend oder gar nicht erfasst werden, was dazu führt, dass sich Gießgase mit der Hallenluft vermischen; dies führt zu erhöhten Gefahrstoffexpositionen der Gießereibeschäftigten. Die Gießgase mit ihren Schadstoffen und Geruchsstoffen stellen für die deutschen Gießereien ein herausragendes Problem des Umweltschutzes sowie für den Arbeitsschutz dar. Darüber hinaus treten in der Umgebung von Gießereien Immissionen auf, welche die immer kritischer werdende Nachbarschaft zu Beschwerden veranlasst. Zur Sicherstellung der sozialen Akzeptanz der Gießereien an ihren traditionellen Standorten und/oder unter öffentlichem Druck sind die Betriebe gezwungen, Abhilfe zu schaffen. Nur die Gießereien, die den steigenden Anforderungen von Gesellschaft und von Nachbarschaft an den Gesundheitsschutz und den Umweltschutz dauerhaft sicher nachkommen, schaffen Standortsicherheit für das Unternehmen und seine Beschäftigten. Emissionen von Schadstoffen und Geruchsstoffen in den Gießgasen gefährden diese Standortsicherheit. Insbesondere bei Ausweitungen der Kapazität der Betriebe und bei Einholung der vorher notwendigen immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen schränken die Gießgase die Entwicklungsmöglichkeiten der Gießereien häufig ein. Der Fachausschuss „Arbeitsschutz, Umweltschutz und Energietechnik“ im Verein Deutscher Gießereifachleute e. V., der technisch-wissenschaftlichen Vereinigung der deutschen Gießereiindustrie, hat in seiner Herbstsitzung 2005 eine Liste der wichtigsten FuE-Aufgaben innerhalb seines Fachgebiets erstellt und im Jahr 2009 nochmals bekräftigt, dass die Forschung zur Entwicklung einer technischen Maßnahme gegen schadstoff- und geruchsstoffbeladene Gießgase mit deutlichem Vorsprung an erster Stelle stand bzw. steht. Bei der Beschreibung der Best Verfügbaren Technologien im BVT-Merkblatt Gießereien heißt es im Abschnitt 7.4

*Empfehlungen für zukünftige Arbeiten unter Techniken zur VOC-Minderung.* „VOC-Emissionen werden bei der thermischen Zersetzung von Bindern während des Gießens [freigesetzt], ... und sind Hauptumweltthema der Branche. VOC-Emissionen in Gießereien treten typischerweise in Verbindung mit großen Volumina und kleinen Fließmengen auf, stellen eine signifikante Umweltbelastung dar und können zu Geruchsemissionen führen. Informationen werden zu Techniken zur effektiven Erfassung und Behandlung dieser Flüsse, zu damit verbundenen Emissionen und ökonomischen Daten benötigt.“

An der Lösung des Problems der Emissionen aus Gießereien und der resultierenden Geruchsimmissionen wurde/wird intensiv gearbeitet. In mehreren Arbeiten des IfG wurden in Gießereien die unterschiedlichen Produktionsbereiche auf Emissionen untersucht. Gemeinsam mit namhaften Gießereien und Herstellern von chemischen Einsatzstoffen, wie Formstoffbindemitteln, sind F&E–Arbeiten erfolgreich durchgeführt worden. Erarbeitet wurden bzw. werden aussagefähige Messmethoden zur Bestimmung von Gerüchen aus Gießereien, Primärmaßnahmen und Sekundärmaßnahmen zur Minderung der Gesamtemissionen aus Gießereien und der resultierenden Geruchsimmissionen [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Die Aufgabenstellung ist allerdings sehr komplex: Die rd. 700 Gießereien in Deutschland sind sehr unterschiedlich hinsichtlich ihrer Einsatzstoffe und ihrer Fertigungsverfahren – was zu unterschiedlichen Schadstoffen, -quellen und – Massenströmen führt – sowie hinsichtlich der Seriengröße ihrer Produkte und der Betriebsgröße – was zu deutlichen Unterschieden bzgl. der realisierbaren und wirtschaftlich zumutbaren lufttechnischen Anlagen führt.

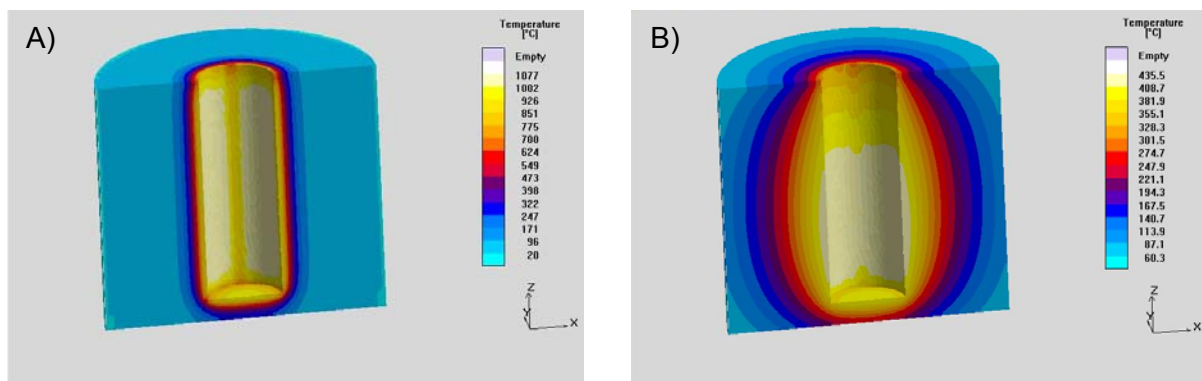
Ziel der durchgeführten Arbeiten war es, an die positiven Ergebnisse eines von der DBU unterstützten Projektes, bei dem eine integrierte Gießgasverbrennung entwickelt wurde, anzuknüpfen [8]. Es wurde aufbauend auf die erarbeiteten Grundlagen ein vollständiges lufttechnisches System (Einsatzstoffe, Verfahrensschritte etc.) entwickelt, dass unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine betriebliche Lösung für die Gießereien darstellt.

### 3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Projektes

#### 3.1 Gießgas

##### 3.1.1 Gießgasbildung

Auf der Formoberfläche und im Formstoff, mehr oder weniger homogen verteilt, befinden sich organische, überwiegend polymere Verbindungen (Harze, Glanzkohlenstoffbildner wie Kohlenstaub, Lösungsmittel aus der Schlichte), welche maßgeblich an der Schadstoffbildung beteiligt sind [3].



**Abbildung 1:** Exemplanische Darstellung einer Simulation der Temperaturverteilung in einer Form, fünf Minuten (A) und zwei Stunden (B) nach dem Abguss

In Abbildung 1 wird eine Simulation, die den Temperaturverlauf über die Zeit exemplarisch veranschaulicht (5 min (A) u. 2 h (B)), dargestellt [3]. Beim Abguss wird die Formoberfläche bis auf die Schmelztemperatur, beispielsweise 1400 °C beim Eisenguss erhitzt, eine Grenzphase von etwa 3 cm um das Gussstück herum erfährt einen Temperaturgradienten von 1400 °C bis auf circa 600 °C. Weiter außenliegende Formteile erreichen in der Regel nicht mehr als 600 °C. Unter Volumengesichtspunkten bildet sich ein kleiner Hochtemperaturbereich - der hier auf 1400 bis 900 °C begrenzt wird - ein etwas größerer Mitteltemperaturbereich von ca. 900 bis 300 °C, ein großer Niedertemperaturbereich dahinter und eine kleinere Randzone, die nicht erhitzt wird und darum nicht an der Schadstoffbildung beteiligt ist, sondern durch Kondensationsvorgänge schwerflüchtige Pyrolyseprodukte zurückhält [2].

**Tabelle 1:** Temperaturbereiche und entsprechende Reaktionen

Temperaturbereich	Reaktionen
Niedertemperaturbereich ca. Raumtemp. - 300 °C	Verdampfung flüchtiger Bestandteile (Weichmacher, etc.), Monomerenbildung, Decarbonylierungen, Decarboxylierungen, Umlagerungen
Mitteltemperaturbereich ca. 300 - 900 °C	Crackvorgänge, Radikalkettenreaktionen, weitgehende Verkokung, Spaltgasbildung + Ruß + Teer.
Hochtemperaturbereich ca. 900 - 1 400 °C	Plasmabildung, Wasserzersetzung (Sauerstoff + Wasserstoff), C-H-Spaltung in Wasserstoff + Graphit.

In diesem breiten Temperaturfenster (s. Tabelle 1) laufen völlig unterschiedliche thermochemische Vorgänge ab, da die Substanzen in der Form im Idealfall zwar homogen verteilt, aber eben unterschiedlich hohen Temperaturen ausgesetzt sind [9].

Mehrere Autoren zeigen, dass die Abspaltung kleinerer Moleküle unter Massenverlust bis circa 850 °C weitgehend abgeschlossen ist und ein koks- bzw. russartiger Rückstand entsteht [9], [10], [11], [12]. Bei noch höheren Temperaturen wird u. a. aus vergastem Kohlenwasserstoffen, wie z. B. dem in der Literatur beschriebenen Methan, Wasserstoff durch C-H-Bindungsspaltung freigesetzt [11]. Dies fördert wiederum die Ethen- sowie die Ethinbildung und führt beim Abkühlen z. T. zu neuen Verbindungen, welche sich aus dem ursprünglichen Substrat nicht einfach herleiten lassen.

Die diversen Vorgänge laufen in der Form teilweise parallel ab.

### 3.1.2 Gießgasaustritt

Nach dem Eingießen des flüssigen Eisens in die Form schwillt der emittierte Strom an Gießgas schnell an, um nach Erreichen eines individuellen Maximums exponentiell abzuklingen. Der Abgasstrom ist bei größeren Formen an manchen Austrittspunkten genügend groß und genügend „fett“, um brennbar zu sein. Die Entzündung erfolgt zum Teil selbsttätig an heißen Oberflächen oder wird absichtlich herbeigeführt. Wird aufgrund zu niedriger Gasströmung oder zu hoher Verdünnung die Zündung nicht erreicht, entweichen die Gase unverbrannt. Da viele Schadstoffe durch Verbrennung normalerweise weitgehend zerstört werden, muss davon ausgegangen werden, dass der nichtverbrannte Teil maßgeblich für die Schadstoffbelastung verantwortlich ist.

Zugleich wird verständlich, dass es auch stark von den Details des Gießprozesses abhängt, wie sich die Mengenverhältnisse an Kohlenwasserstoffen und Kohlendioxid im Abgas entwickeln.

### 3.2 Gasbehandlung

Für Gießereien aber auch in anderen Industriezweigen ist die Vermeidung bzw. die Minderung von Schadstoffemissionen gesetzlich geregelt und folglich ein wichtiges Thema für die Betreiber. Um den behördlich vorgegebenen Grenzwerten zu entsprechen, werden in der Industrie vielfältige Maßnahmen ergriffen. Hierbei wird prinzipiell zwischen zwei Ansatzpunkten unterschieden

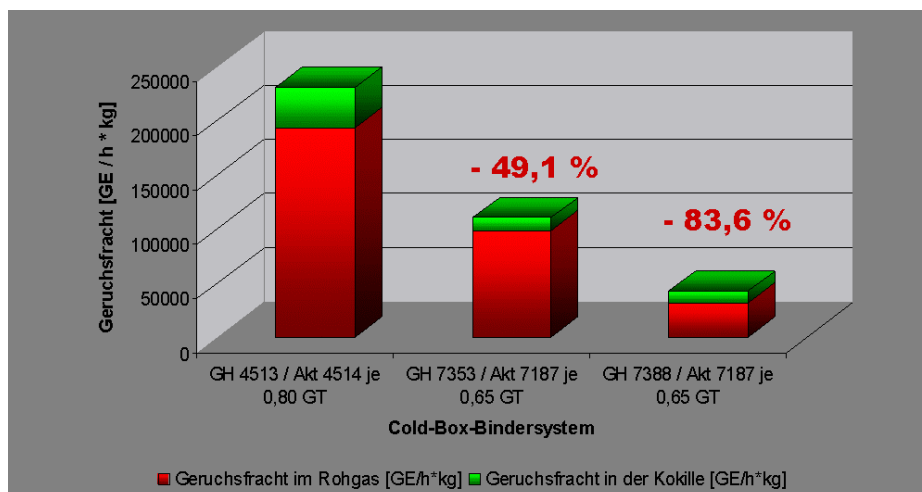
1. Primärmaßnahmen
2. Sekundärmaßnahmen.

Im Folgenden werden diese Maßnahmen erläutert.

#### 3.2.1 Primärmaßnahmen

Primärmaßnahmen sollen schon die Bildung von Schadstoffen verringern. In Gießereien zählt die Anpassung der Formstoffbestandteile zu den primären Maßnahmen, so dass weniger schädliche Pyrolyseprodukte gebildet werden. Durch geschickte Modifikationen der Formstoffbestandteile ist es möglich präventiv die Gießgasbildung sowie die Gießgaszusammensetzung bis zu einem gewissen Grad zu steuern [3], [4].

In gemeinsam mit namhaften Gießereien und Herstellern von chemischen Einsatzstoffen durchgeführten F&E-Arbeiten sind erfolgreich Maßnahmen erarbeitet worden, die die Emissionen von Formstoffbindemitteln vermindern, jedoch bisher nicht nachhaltig beseitigen [1], [2], [3], [4]. In Abbildung 2 wird am Beispiel einer Binderentwicklung eines Cold-Box-Bindersystems eine solche Reduktion bezogen auf die Geruchsfracht verdeutlicht.



**Abbildung 2:** Beispiel einer Binderentwicklung

Die Ergebnisse der F&E-Arbeiten zeigen, dass die Substitution aromatischer Lösungsmittel durch Rapsölmethylester zu einer Herabsetzung der BTX-Emission führt, aber eine signifikante Geruchsreduktion ausbleibt.

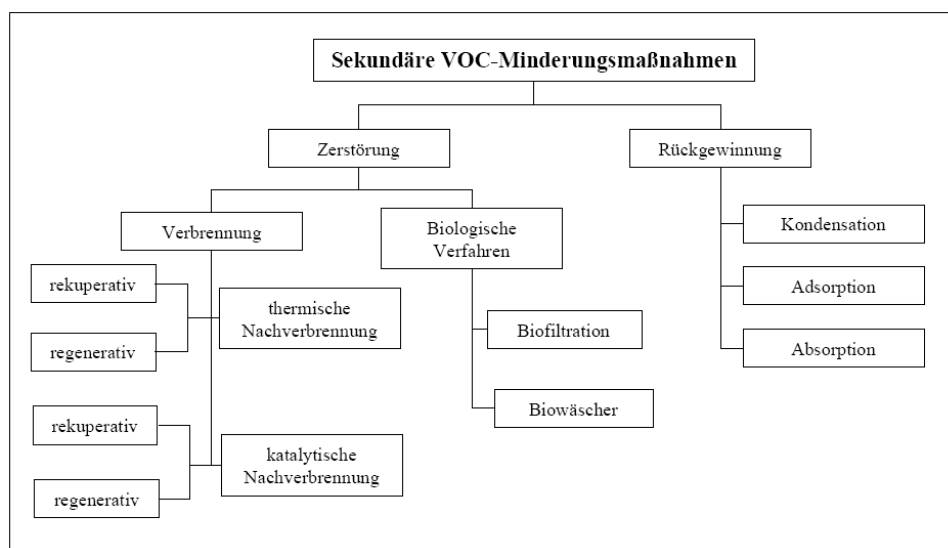
### 3.2.2 Sekundärmaßnahmen

Nachgeschaltete ("End-of-pipe Technologien") oder sog. sekundäre Maßnahmen werden zur Beseitigung von Schadstoffen in Abgasen verwendet. Die Verfahren werden in der Industrie eingesetzt, wenn eine grundlegende Verfahrensumstellung auf lösemittelfreie und – arme Einsatzstoffe aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist oder die Lösemittel durch geeignete Techniken zurückgewonnen und im Produktionsprozess wiederverwendet werden können. Im Wesentlichen lassen sich zwei Kategorien von sekundären Emissionsminderungsmaßnahmen unterscheiden:

1. Verfahren, die eine Rückgewinnung von VOC aus dem Abgas und deren Wiederverwendung als Lösemittel ermöglichen.
2. Verfahren, bei denen eine irreversible Umwandlung der im Abgas enthaltenen VOC in umweltverträglichere Stoffe stattfindet (wie z.B. Nachverbrennungsverfahren oder biologische Verfahren); dazu werden auch Maßnahmen zur Rückgewinnung von Energie gezählt. [13], [14].

Abbildung 3 gibt einen Überblick über verschiedene sekundäre VOC-Emissionsminderungsmaßnahmen. Dabei können die nachfolgenden Verfahren als Standardverfahren betrachtet werden:

- Thermische und katalytische Nachverbrennung,
- Absorption,
- Adsorption,
- Biologische Verfahren.



**Abbildung 3:** Überblick über VOC-Minderungsmaßnahmen



## 4 Methoden

### 4.1 Grundlegende Versuchsabläufe

#### 4.1.1 Schmelztechnik

Die Abgussversuche wurden überwiegend im IfG-Technikum in Duisburg durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden die dort installierten Induktionsofenanlagen eingesetzt. Typischerweise wurden die Schmelzen je nach Fragestellung in einem Induktions-Hubofen für bis zu 45 kg Flüssigisen oder in einem Induktions-Kippofen (s. Abb. 4) für bis zu 200 kg erstellt.



**Abbildung 4:** Einsatzmaterial (links) und Abstich am Induktions-Kippofen (rechts) im IFG-Technikum

Zum Einschmelzen wurde gusseisernes Kreislaufmaterial bzw. Gussbruch mit einer GJL (Gusseisen mit Lamellengraphit, s. Abb. oben) Legierung, wie sie auch in Gießereibetrieben zum Einsatz kommt, verwendet. Ihre Zusammensetzung betrug im Durchschnitt: C: 3,2%; Si: 2%; Mn: 0,05%; P: 0,017%; S: 0,007%; Cr: 0,03%; Cu: 0,1%.



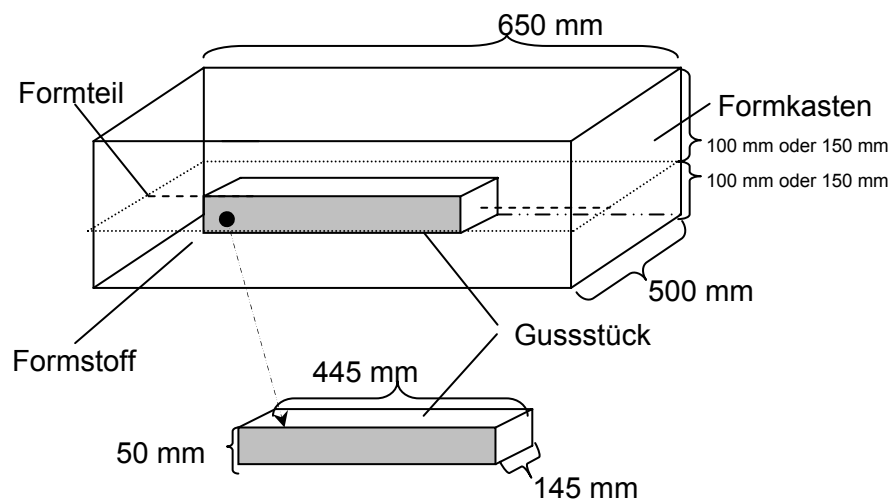
**Abbildung 5:** Schmelztiegel und Abguss an der Absaugeinrichtung

Wie in der Abbildung 5 (rechts) zu sehen, erfolgte der Abguss mit einem Gießgeschirr und einem Schmelztiegel aus Siliciumcarbit (links). Abgegossen wurde meist direkt an der speziell gefertigten Versuchsanlage an der die Gasmesstechnik angeschlossen ist. Im Rahmen der durchgeführten Abgussversuche betrug die Temperatur des Flüssigeisens 1400° C.

#### 4.1.2 Formtechnik

In Gießereien kommt eine Vielzahl von Formstoffsystemen zur Formherstellung zum Einsatz. Hierbei stechen zwei Verfahren, wegen ihrer großen Verbreitung besonders heraus. Es handelt sich dabei zum Einen um ein Bindersystem auf Bentonitbasis (Grünsand) und zum Anderen um ein Kaltharzbindersystem auf Furfurylalkoholbasis (Furanharz-Sand). Darüber hinaus werden in der Gießereiindustrie sehr häufig mit Amin begaste Kernformstoffsysteme eingesetzt, die einen hohen Emissionsgrad an Schadstoffen aufweisen. Um ein produktionsnahes Methodenprinzip zu gewährleisten, wurden die beschriebenen Kernformstoffsysteme exemplarisch in die Versuchsabläufe integriert.

Neben anderen Formgeometrien wurden die Technikumsversuche überwiegend mit den typischen Standardformen bzw. Standardformkästen durchgeführt. Die Dimensionen des Gussstücks sowie der Kasten geometrien sind der Abbildung 6 zu entnehmen.



**Abbildung 6:** Skizze der (des) Standardform(kastens) ohne Anguss

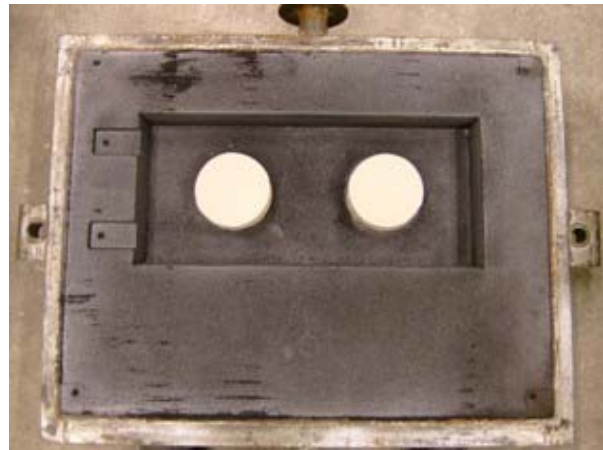
##### 4.1.2.1 Grünsandsystem

Um betriebsnahe Bedingungen zu schaffen, wurde ein originaler Kreislaufsand aus einer Großgießerei verwendet. Die Eigenschaften, die durch regelmäßig durchgeführte Laborkontrollen ermittelt wurden, sind im Anhang zu finden (s. Anhang C).

Die Grünsandformen wurden wie folgt hergestellt:

- Aufbereiten des Grünsandes mit einem Wassergehalt von ca. 3 % und einer Mischzeit von 60 s in einem Hochgeschwindigkeits- Wirbelmischer.
- Verdichten des Formsandes auf der Modellplatte per Rüttel-Press-Verfahren.
- Kerneinlegen in die Form.
- Zulegen der Form und Abkleben der Teilungsebene.

Das Sandgewicht einer Form lag bei ca. 150 kg und die zylindrischen Kerne hatten bei einer Länge von 75 mm und einem Durchmesser von 95 mm ein Gewicht von 840 g.



**Abbildung 7:** Wirbelmischer und exemplarische Abbildung eines Unterkastens mit Kernen

#### 4.1.2.2 Furansandsystem

Zur Herstellung der Furanharzformen wurde ein ASK Askuran F339 Harz und ein ASK Härter GS 2 verwendet. Das Mischungsverhältnis betrug 1 % Harz zu 0,4 % Säure.



**Abbildung 8:** Bindersystem mit Harz und Säure

Die Mischzeit pro Mischung betrug 90 s und das Sandgewicht pro Form lag wie beim Grünsand auch bei ca. 150 kg. Als Formgrundstoff kam ein F32 Sand zum Einsatz. Der Sand



wurde mit dem Bindersystem in einem Schwingmischer vermischt und nachher von Hand auf der Modellplatte verdichtet. Die Aushärtezeit betrug ca. 2 Stunden. Die Modellplatten wurden so konstruiert, dass man sie sowohl für das Grünsandsystem als auch für das Furanharzsystem verwenden konnte.



**Abbildung 9:** Modellplatten (links) und Verdichten des Furansandes (rechts)

### 4.1.3 Messtechnik

#### 4.1.3.1 Ermitteln der Messdaten

Um die nach dem Abguss entstehenden Pyrolysegase auf ihre Bestandteile analysieren zu können, wurden unter Anderen die unten aufgeführten messtechnischen Einrichtungen zur Onlineanalyse eingesetzt.

- Gas-Analyser zur Bestimmung von CO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und O<sub>2</sub>.
- Flammenionisationsdetektor (FID) um die Summe aller organischen Verbindungen im Gießgas als Propanäquivalente anzuzeigen.



**Abbildung 10:** Aktivkohleröhrchen BIA Typ II und Flammenionisationsdetektor (FID)

Der Nachweis der restlichen Schadstoffe war komplizierter und konnte nicht online durchgeführt werden. Daher wurden diese im Anschluss nach dem Versuch im Gaslabor durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden 12 L des, in einem Probenbeutel aufgefangenen,

Gießgases über Aktivkohleröhrchen (Dräger BIA Typ II) geleitet und adsorbiert. Durch anschließende thermische Behandlung der Aktivkohle im Gaslabor, wurden die Gase resorbiert, so dass sie für weitere Analysenverfahren zugänglich waren. Die Benzol-, Toluol-, Ethylbenzol-, o-Xylol-, m-Xylol-, p-Xylol- und Naphthalinkonzentration wurde entsprechend der VDI-Norm 3865 (Bl. 3) von einem akkreditierten Fremdlaboratorium gaschromatographisch ermittelt (Erg. s. Kap. 5.2.1 u.v.).

Neben den Gasinhaltsstoffen wurden auch durch Einsetzen von Thermoelementen (CrNi-Basis) in den Formsand die Temperaturverläufe in unterschiedlichen Sandtiefen ermittelt. Die Thermoelemente wurden hierbei Zentral über dem Gussteil im Abstand von je 9,5 cm, 10,5 cm, 12 cm und 13,5 cm angeordnet (s. Abb. 11).



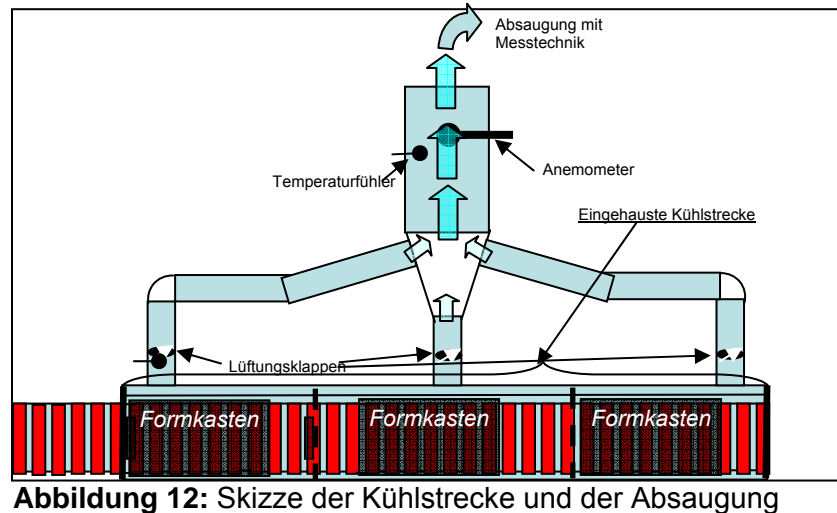
**Abbildung 11:** Position der Thermoelemente in der Form und an der Abdeckung

#### 4.1.3.2 Versuchsablauf und Aufbau

Typischerweise wurde Eisen (40 kg) in einem Siliziumcarbid-Tigel aufgeschmolzen. Beim Erreichen der Abstichttemperatur von ca. 1500 °C wurde das Eisen zur Versuchsanlage transportiert und mit 1400°C in die Standardform gegossen (s. Absch. 4.1.1). Unmittelbar nach dem Abguss wurde 20 mm dickes Isolationsmaterial aus Basaltfasern (Rath, 200 mm x 200 mm) auf den Einguss gelegt und die Einhausung (s. Kap. 4.2.2) mit der zu untersuchenden Konvertierungsmethode auf dem Kasten montiert und unter die Absauganlage gefahren. Das Messen der Emissionen erfolgte an der vom IfG entwickelten Gießstrecke zur gezielten Gießgaserfassung. Der Aufbau und Ablauf der Messtechnik während eines kompletten Abgussversuches, lässt sich wie folgt beschreiben.

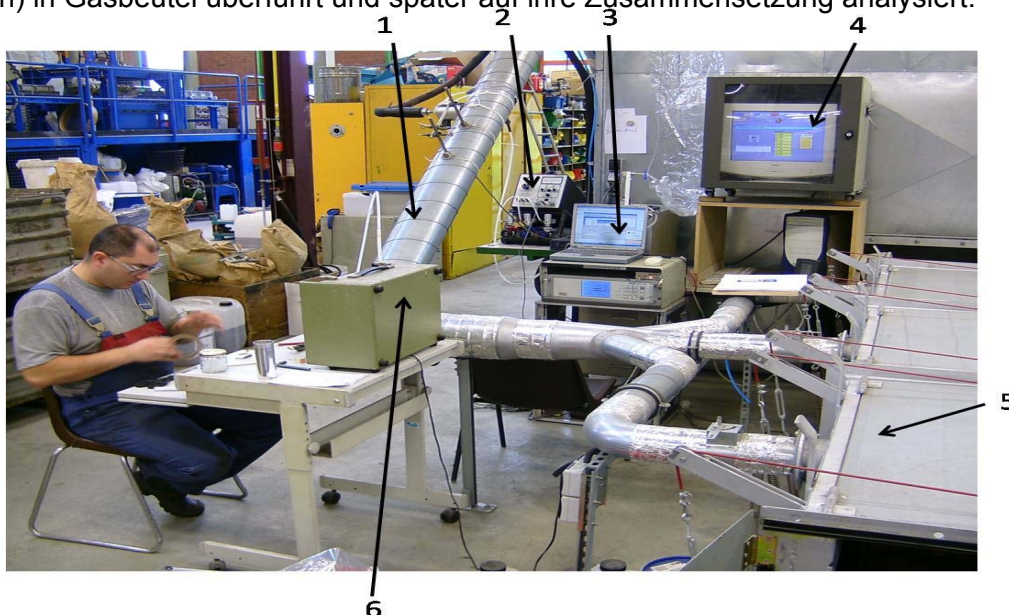
Zu Beginn wurde an der Absauganlage ein Volumenstrom zwischen 30 und 150 m<sup>3</sup>/h eingestellt. Gleich nach dem Abguss wurde der Eingusstümpel mit einer keramischen Isolationsmatte und einem gusseisernen Beschwergewicht (ca. 8 kg) abgedichtet und die Formen (max. 3) auf der Rollenbahn unter die Kapselung der Gießstrecke geschoben (s. Abb. 12). Die Kühlstrecke wurde mit Hauben verschlossen und nur die Absaugleitung

geöffnet, unter der die abgegossene(n) Form(en) stand(en). Die erfassten Gießgase wurden mit einem Gasaufbereiter der Firma M&C Typ PSS 5/3 vorkonditioniert und zum Teil, wie auch die Temperaturverläufe innerhalb der Form, parallel zum laufenden Versuch vermessen.



**Abbildung 12:** Skizze der Kühlstrecke und der Absaugung

Ebenfalls parallel zum laufenden Versuch wurde ein Teil des Gießgases mit einer Schlauchquetschpumpe (1 L/min) dem Abgasstrom entnommen und in einen speziellen Gasprobenbeutel geleitet, um mit diesem die Labor- sowie die olfaktometrischen Untersuchungen durchführen zu können. Die Gießgase wurden über eine Dauer von 1 h abgesaugt, gesammelt sowie gemessen. Bei Versuchsreihen die nicht an der Gießstrecke durchgeführt wurden, wurden die entstandenen Gießgase mit einer Schlauchquetschpumpe (1 L/min) in Gasbeutel überführt und später auf ihre Zusammensetzung analysiert.



**Abbildung 13:** [1] Absaugleitung; [2] FID-Messgerät; [3] Gas-Analyser mit Laptop zur Datenverarbeitung; [4] Messrechner zur Aufnahme der Abkühlkurven, Luftfeuchtigkeit und der FiD-Daten; [5] Gießstrecke mit Kapselung; [6] Pumpe zur Aktivkohlebeladung

### Das Vermeiden von Ergebnisschwankungen:

Aufgrund der Komplexität eines solchen Abgussversuches ist es oftmals schwierig, mehrere Versuchsergebnisse direkt miteinander vergleichen zu können. Dies kann folgende Ursachen haben:

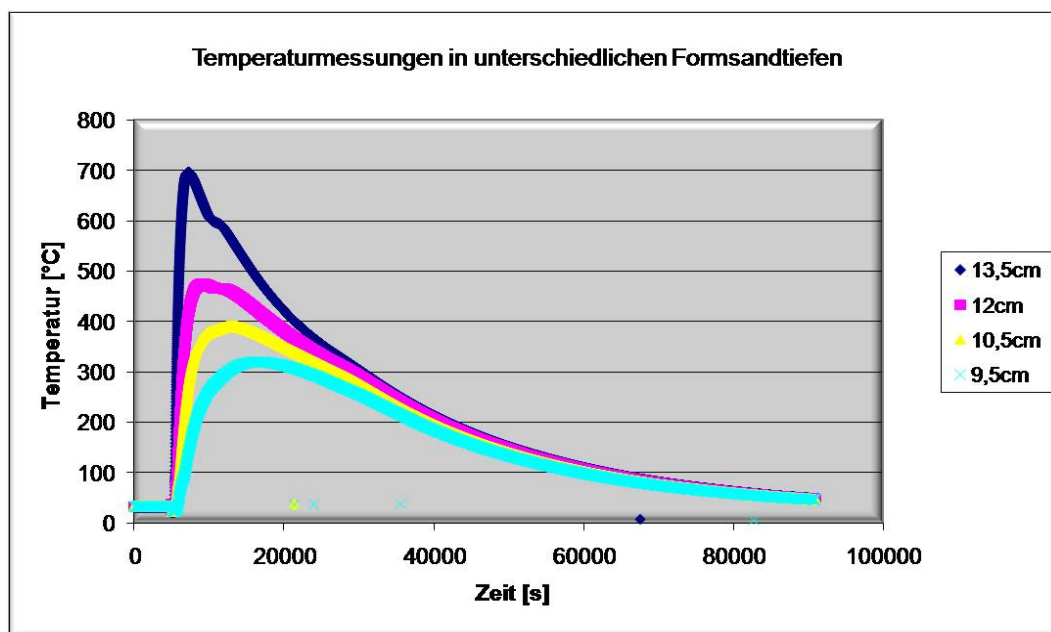
- Unterschiedliche atmosphärische Bedingungen (Druck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit), die sich besonders stark bei Gasproben auswirken.
- Unterschiede im Formsandsystem (Wassergehalt, Feinstaubgehalt usw.)
- Unterschiede in der Verdichtung des Formsandsystems
- Unkontrolliertes austreten der Gießgase nach dem Abguss (Gasschübe)

Daher wurde zur Minimierung dieser Fehlerparameter jeweils eine Form zusätzlich Abgegossen (Relativmethode), um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Diese Standard-Form wurde am selben Tag, mit dem gleichen Formsandsystem und unter identischen Bedingungen hergestellt. Sie wurde als Referenzprobe immer vor einem Versuch abgegossen und deren Gasemissionen gemessen.

Durch dieses Verfahren war es möglich den Wirkungsgrad einer neu entwickelten Methode zur Gießgasverbrennung optimal zu bestimmen.

#### 4.1.3.3 Datenaufbereitung

Die Datenerfassung erfolgte überwiegend mit Hilfe entsprechender Computerinterface, welche über ganz unterschiedliche Softwaresysteme an- bzw. gesteuert wurden. Die Folge für die Auswertung der Daten ist, dass die erhaltenen Datenkolonnen auf ein einheitliches Dateiformat permutiert werden mussten. Die so geschaffenen Datenpakete konnten dann in eine einzige Bearbeitungssoftware eingelesen und ausgewertet werden.

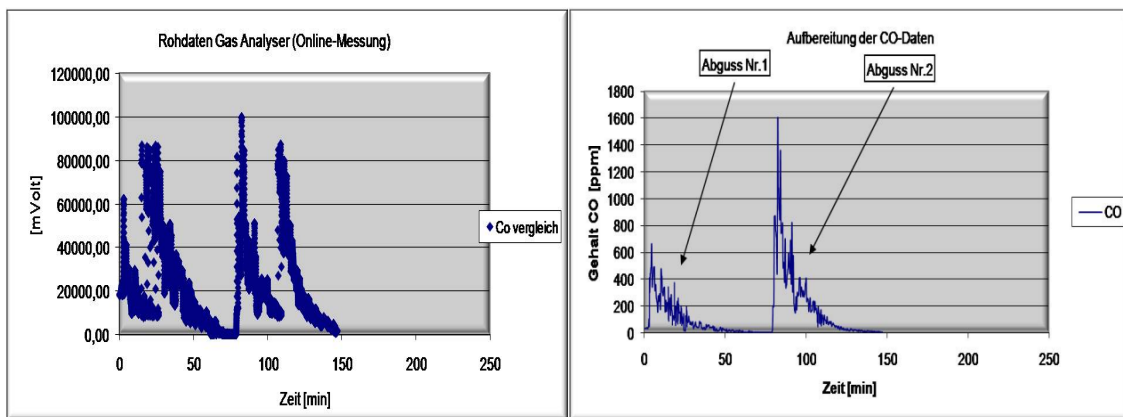


**Abbildung 14:** Exemplarische Darstellung der Temperaturverläufe in unterschiedlichen Formsandtiefen

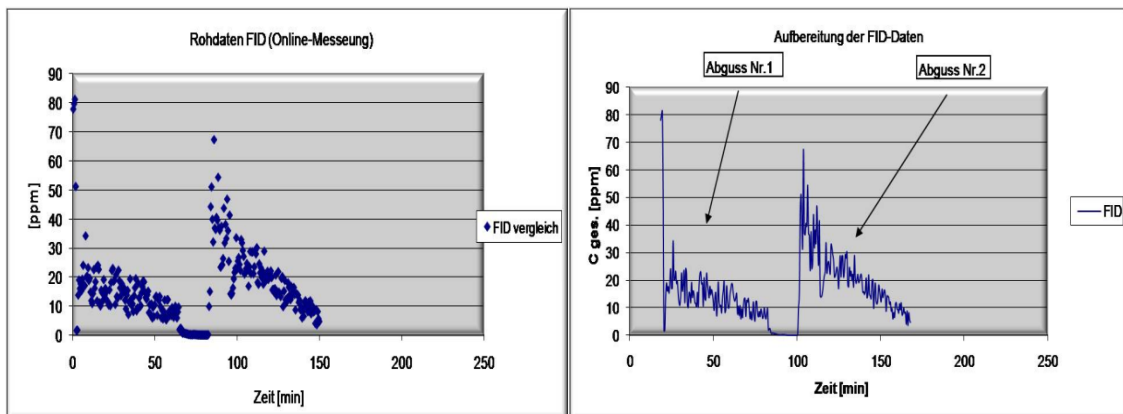


Die Daten der Abkühlkurven wurden von einer hauseigenen Software des IfG aufgezeichnet und konnten nach ihrer Konvertierung in ZTU-Schaubildern dargestellt werden.

Bei den Daten des Gas-Analysers und des FID-Messgerätes mussten die Taktfrequenzen der Messgeräte umgerechnet und in Übereinstimmung mit einem gebräuchlichen Zeitmaß gebracht werden. Des Weiteren wurden die Messgeräte vor jeder Messung mit Kalibriergasen neu geeicht. Diese aufgezeichneten Eichkurven mussten in jeden Datenpunkt der Rohdaten eingerechnet werden. Die Rohdaten des Gas-Analysers wiesen zudem noch einen "Umschaltbereich" auf, der die Wertigkeit der Messdaten um eine Zehnerpotenz erhöhte. Diese Erhöhung wurde allerdings nicht automatisch durch die Software erkannt und kompensiert, so dass dieser Faktor nachträglich angepasst werden musste.



**Abbildung 15:** Vergleich zwischen den Rohdaten (links) und den aufbereiteten Daten (rechts) des Gas-Analysers



**Abbildung 16:** Vergleich zwischen den Rohdaten (links) und den aufbereiteten Daten (rechts) des FID-Messgeräts

Um die jeweilige Gesamtemission eines kompletten Versuches zu Bestimmen wurden die Kurvenverläufe integriert und für eventuelle Langzeitverläufe beim Großguss extrapoliert.



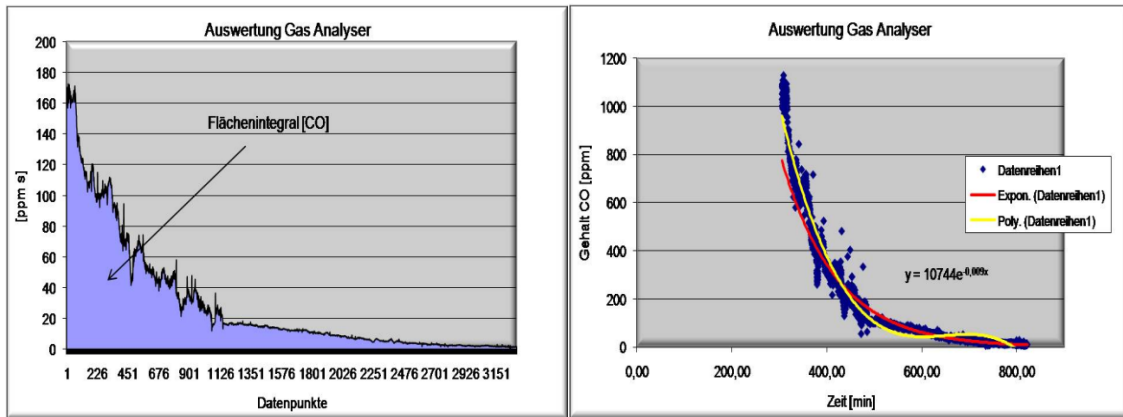


Abbildung 17: Integration (links) und Extrapolation (rechts) der Messdaten

## 4.2 Erarbeitung spezifischer Methoden

### 4.2.1 Gießgaserfassung an der gesamten Form

Um bestmögliche Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad bei folgenden Versuchen ziehen zu können, wurde zu Beginn der Messreihen ermittelt, welche Gasmengen mit einer Abdeckung erfasst werden können. Zu diesem Zweck wurde an einer Form der Ober- und der Unterkasten mit jeweils einer Holzabdeckung von einer Länge von 680 mm, einer Breite von 530 mm und einer Höhe von 55 mm versehen. Wie in Abbildung 18 zu sehen, wurden spezielle Gasbeutel angebracht um quantitative Untersuchungen der Gießgasfreisetzung durchführen zu können. Da die Erfahrung zeigt, dass ein Teil der Gießgase aus der Teilungsebene des Formkastens austritt, wurde diese mit Kernkleber abgedichtet. Damit sich die Gase nach Oben wie Unten frei entfalten konnten, wurde der gesamte Versuchsaufbau an einem Kran aufgehängt.



Abbildung 18: Versuchsanordnung zur Gasaustrittsbestimmung

#### 4.2.2 Abdeckungen zur gezielten Gießgaserfassung

Die zuvor durchgeführten Versuche zur Gasaustrittsbestimmung zeigten, dass der Großteil der emittierten Gießgase über den Oberkasten entweicht (bis zu 96 %). Die logische Aufgabenstellung war nun eine Abdeckungsmöglichkeit zu konstruieren, die alle Gießgase erfasst und bei geringem Kostenaufwand möglichst einfach in der Handhabung ist.

##### 4.2.2.1 Holz-Abdeckung

Für Voruntersuchungen wurde eine Abdeckung, wie sie in Abbildung 19 zu sehen ist, aus Holz konstruiert. Sie war sehr leicht, kostengünstig und einfach herzustellen. Wegen der geringen thermischen Beständigkeit, wurde diese durch eine Metallabdeckung substituiert.



Abbildung 19: Holzabdeckungen zur Erfassung der Gießgase

##### 4.2.2.2 Stahl-Abdeckung

Damit die Abdeckung besser der thermischen Beanspruchung beim und nach dem Abguss standhält, wurde eine Stahlabdeckung mit einer Länge von 725 mm, einer Breite von 555 mm und einer Randhöhe von 60 mm angefertigt (s. Abb. 20). Diese Abdeckung war sehr viel widerstandsfähiger gegenüber sämtlichen mechanischen und thermischen Belastungen als es die Holzabdeckung war.

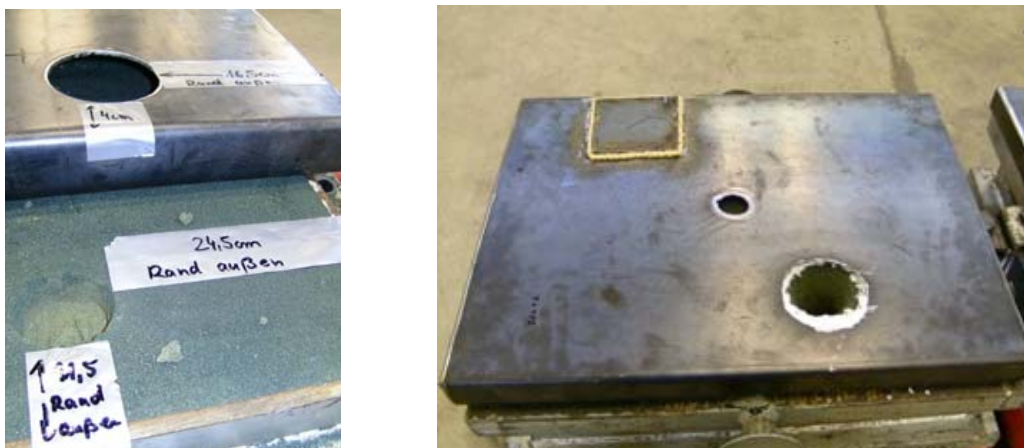


Abbildung 20: Abdeckung aus Stahl mit Eingussöffnung

#### 4.2.2.3 Aluminium(folien)-Abdeckung

In der Gießereiindustrie kommen die unterschiedlichsten Formkastengeometrien zum Einsatz. Um auf diese Unterschiede flexibel reagieren zu können, wurde eine Abdeckung aus Aluminiumfolie der Firma Hydro Aluminium GmbH mit einer Stärke von 0,1 mm getestet. Die Folie war ausreichend resistent gegenüber der Hitzeeinwirkung und konnte leicht an jede beliebige Kastengeometrie angepasst werden. Um Vor-Ort-Untersuchungen in den Gießereien durchzuführen, ist dies eine ideale Möglichkeit die Gießgase zu erfassen und mit der entsprechenden Methode zu konvertieren.



Abbildung 21: Abdeckung aus einer Aluminiumfolie

#### 4.2.3 Gießgaserfassung mit Luftpfeifen

In vielen Gießereien die mit Sandformguss arbeiten werden zur Entlüftung während des Gießprozesses, Luftpfeifen eingeformt. Gase strömen primär durch Regionen, die den geringsten Widerstand für sie aufweisen und daher tritt durch diese Luftpfeifen eine große Menge an Gießgasen aus. Um diese quantitativ zu bestimmen und um sie ins Verhältnis mit dem Gesamtvolumen an entstehenden Gießgasen setzen zu können, wurden unterschiedlichste Luftpfeifen mit verschiedenen Geometrien eingeformt und deren Gasaustritt gemessen.

Die folgenden Luftpfeifenvariationen wurden untersucht:

- a)  $d=10\text{mm}$ ,  $h=100\text{mm}$  (bis zum Gußteil), Platzierung: über dem Gussstück
- b)  $d=40\text{mm}$ ,  $h=80\text{mm}$ , ohne Luftkanäle, Platzierung: über dem Gussstück
- c)  $d=40\text{mm}$ ,  $h=80\text{mm}$ , mit 5 Luftkanälen, Platzierung: über dem Gussstück
- d)  $d=40\text{mm}$ ,  $h=100\text{mm}$  (bis zur Teilungsebene), Platzierung: neben dem Gussstück





**Abbildung 22:** Messungen an Luftpfefen mit unterschiedlicher Geometrie

#### 4.2.4 Entwicklung von Konvertierungsmethoden

##### 4.2.4.1 Gasbrenner zur Nachverbrennung von Gießgasen

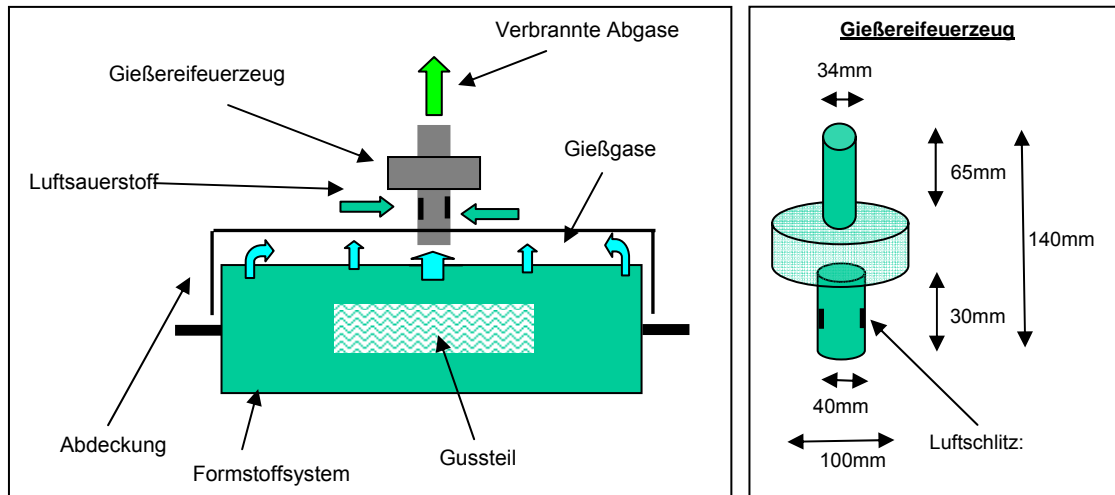
Die Anwendung von brennbaren Gasen zur Nachverbrennung der Gießgase sollte untersucht werden. Dazu wurde eine Lötlampe mit 190 g Butan-Gas auf einer Stahlabdeckung befestigt. Die durch den Kamin der Abdeckung geleiteten Gießgase wurden so automatisch der Gasbrennerflamme zugeführt. Die Versuche wurden an beiden Formsandsystemen, sowie mit- und ohne Kerne durchgeführt



**Abbildung 23:** Nutzung eines Gasbrenners zur Nachverbrennung der Gießgase

##### 4.2.4.2 "Gießereifeuerzeug" zur Nachverbrennung von Gießgasen

Um die Wirkungsweise von flüssigen Zusatzbrennstoffen zu untersuchen, wurde ein spezielles "Gießereifeuerzeug" konzipiert und gefertigt. Die Konstruktion dieses Gießereifeuerzeugs wurde sukzessiv nach jedem Versuch verbessert, um dessen Wirkungsgrad zu erhöhen. Es wurden unterschiedliche Kohlenwasserstoffe, wie z. B. Ethanol, Isopropanol oder Petroleum auf ihre Eignung als flüssiger Zusatzbrennstoff untersucht. Als Dochtmaterial wurde Baumwolle und Glasfaser getestet, wovon letztendlich das Glasfasermaterial zum Einsatz kam.

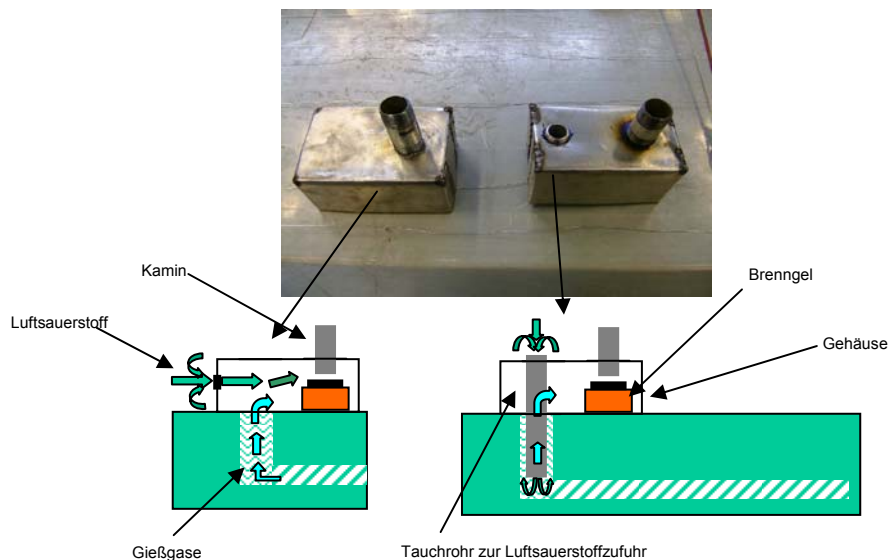


**Abbildung 24:** Prinzipskizze des Gießereifeuerzeugs

Neben den Versuchen zur Bestimmung des Wirkungsgrades dieser Konvertierungsmethode an eingehausten Formkästen, wurde diese Methode auch an Gießpfeifen eingesetzt.

#### 4.2.4.3 "Brennkammer" zur Nachverbrennung von Gießgasen

Für die Untersuchung der Anwendbarkeit von gelförmigen Zusatzbrennstoffen, kam eine Brennpaste (Chafer Gel, Ser.Nr. 200-578-6) zum Einsatz. Diese Brennpaste wurde in einer dafür entwickelten "Brennkammer" gezündet und deren Wirkungsgrad ermittelt. Es sind zwei Modelle der Brennkammer mit verschiedenen Belüftungssystemen konzipiert worden.



**Abbildung 25:** Funktionsprinzip der Brennstoffkammern mit Brenngel

Wie die Prinzipskizze in Abbildung 25 zeigt, strömen die Gießgase in die Brennkammer ein und vermischen sich mit Luftsauerstoff. Das nun entstandene Mischgas strömt, wegen des Kamineffekts, über das Brenngel und wird so verbrannt. Das System wurde auch wie in der Prinzipskizze dargestellt an Luftpfeifen getestet.

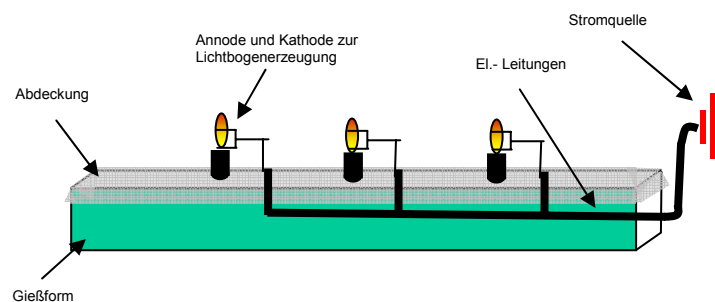
#### 4.2.4.4 "Hochspannungszünder" [HSZ] zur Zündung von Gießgasen

Nicht nur Brennstoffe, sondern auch andere Möglichkeiten zur Reduzierung schädlicher Gießgas- Emissionen wurden im Rahmen des Projektes in Betracht gezogen.

Wie bereits erwähnt wurde, sind die emittierten Gießgase aufgrund ihrer Zusammensetzung (Kohlenwasserstoffe, Wasserstoff etc.) hoch reaktiv und damit brennbar. Dies gilt für Furanharz gebundene Formstoffe und auch für Grünsand. Die Gießgase strömen allerdings nicht mit einer konstanten Rate, sondern in Gasschüben aus dem Formstoff aus. Sie können auf Grund dessen, in der ersten Zeitphase nach dem Abguss, selbstständig abbrennen aber erlöschen wieder wenn sie nicht in regelmäßigen Abständen gezündet werden.

Da der Hauptanteil an Schadstoffen zudem noch in genau dieser ersten Zeitphase emittiert wird, lag das Ziel darin, die Gießgase selbst als Brennstoff zur Nachverbrennung zu nutzen. Daher wurde ein elektrischer Hochspannungszünder (HSZ) entwickelt, um die Gasschübe mit einem Elektronenlichtbogen immer wieder neu Zünden zu können. Die Zündfrequenz des Lichtbogens war regelbar und wurde auf 1Hz eingestellt. Um zu ermitteln ob der Wirkungsgrad noch weiter optimiert werden kann, wurde der HSZ-2 konstruiert und getestet. Beim HSZ-1 wurden nur an einer Stelle der Abdeckung die Gießgase permanent gezündet, wohingegen beim HSZ-2 an 5 Stellen gezündet wurde.

Als Spannungsquelle wurden 9 Volt-Blockbatterien verwendet, von denen beim HSZ-2 zwei zur Stromversorgung der Steuerung in Reihe und drei zur Versorgung der Zündung parallel geschaltet wurden. Als Taktgeber wurde eine Flip-Flop-Schaltung mit Potentiometer eingesetzt.



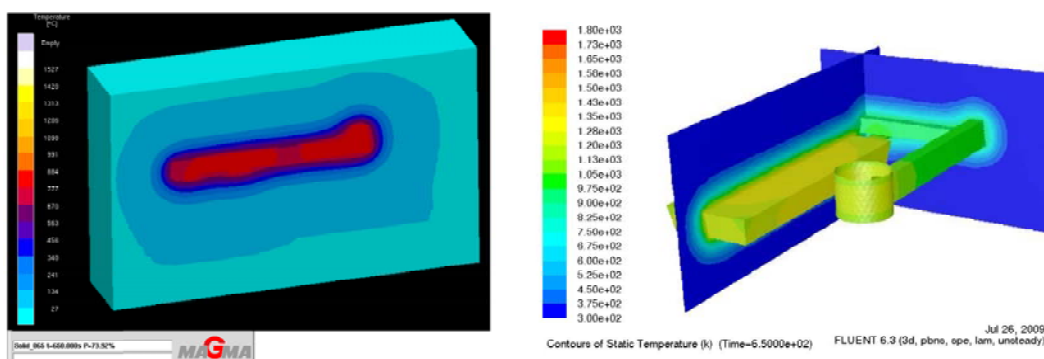
**Abbildung 26:** Darstellung eines HSZ-2 und eine allgemeine Prinzipskizze des Hochspannungszünders

Typischerweise wurde Eisen (40 kg) in einem Siliziumcarbid-Tigel aufgeschmolzen. Beim Erreichen der Abstichttemperatur von ca. 1500 °C wurde das Eisen zur Versuchsanlage transportiert und mit 1400°C in die Standardform gegossen (s. Absch. 4.1.1). Unmittelbar nach dem Abguss wurde 25 mm dickes Isolationsmaterial aus Basaltfasern (Rath, 20mm x 20mm) auf den Einguss gelegt und die HSZ-2-Einhausung auf dem Kasten montiert und

unter die Absauganlage gefahren. Die Hochspannungszündung wurde mittels einer Schaltung generiert und lief bereits vor dem Abguss (Zündfrequenz: 1Hz). Die behandelten Abgase wurden durch die Absaugvorrichtung (s. Absch. 4.2.2 u.v.) des IfG-Technikums erfasst und konnten teilweise online und zum Teil im Anschluss im Gaslabor untersucht werden (Ergebnisse s. Kap. 5.2.4). Nach dem Versuch wurden die Akkumulatoren wieder aufgeladen und die Sandform ausgeschlagen. Bei Versuchen mit einem Grünsandsystem wurde der Sand im Anschluss aufbereitet und in den folgenden Versuchen wiederverwendet. Bei Versuchen mit einem Furanharzsystem wurde der Sand anschließend entsorgt.

### 4.3 Simulation

Im Zuge des Projektes sollten nicht nur praktische, sondern auch theoretische Betrachtungsweisen der Gießgasnachverbrennung angestellt werden. Hierzu wurde eine verfügbare Software für diesen Anwendungsfall adaptiert. Anschließend wurden Simulationsberechnungen durchgeführt. Die Bauteilgeometrien und die Vernetzungen wurden mit dem Programm „Ansa“ generiert und die Strömungssimulationen mit „Fluent“. Temperaturmessungen während der Gießversuche als auch theoretische Untersuchungen der zeitlichen Temperaturverteilung innerhalb der Sandform zeigen, dass das kleine Zeitfenster des Formfüllens nur einen geringen und somit vernachlässigbaren Einfluss auf die Temperaturverteilung hat, wobei die Gießgasentwicklung primär von dieser abhängt.



**Abbildung 27:** Vergleich zweier Simulationen mit und ohne Formfüllung unterschiedlicher Software

Um jedoch den Rechenaufwand für die gleichzeitige Freiflächensimulation der Formfüllung auszuklammern, wird für die Untersuchung der Gießgasströme eine bereits gefüllte Form als Anfangsbedingung gesetzt.

Somit wird als Ausgang für das Berechnungsmodell eine vollständig mit Schmelze gefüllte Gussform mit Gusseisen GJL300 mit 1400°C gewählt, die umgebende Form hat zu Beginn eine Temperatur von 20°C. Die Simulation vereinfacht sich auf die Berechnung der

Gasströmung in der Form und der Wärmeübertragung in den beiden Rechengebieten (Gusseisen und Formstoff).

Zur Beschreibung der Sandform und deren Einfluss auf die Strömung gilt das Modell des porösen Mediums als besonders geeignet. Dabei geht man von einer Impulssenke also einem Druckverlust aus, der in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit in die Impulsgleichung eingefügt werden kann (siehe Gl. 1).

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \rho g + S \quad \text{Gl. 1}$$

Wobei die Geschwindigkeit des Gases aufgrund des weniger gewordenen Hohlraums durch den Betrag der Porosität dividiert wird.  $S$  stellt den Quellterm dar und gleicht im eindimensionalen dem Ausdruck (Gl. 2)

$$S = D\mu v + C \frac{1}{2} \rho v^2. \quad \text{Gl. 2}$$

Wie dem ersten Teil der Gleichung zu entnehmen ist, ist der Druckverlust proportional zu der Geschwindigkeit  $v$  und der Viskosität  $\mu$  und ist nur vom Reibungsverlust abhängig. Der zweite Teil wird jedoch dominant wenn die Trägheitsverluste aufgrund der Turbulenz und somit der hohen Geschwindigkeit nicht mehr vernachlässigt werden können.  $D$  und  $C$  sind jeweils Konstanten für das geeignete Druckverlustmodell.

Für die Bestimmung dieser Konstanten für eine Sandpackung wurde in guter Näherung die Ergun-Gleichung 3 herangezogen, welche in Abhängigkeit der Porosität und des Korndurchmessers den Druckverlust beschreibt.

$$\frac{\partial p_v}{\partial x} = - \left[ \underbrace{\frac{150(1-\phi)^2}{D_p^2 \phi^3} \eta v}_{\text{viskose Reibung}} + \underbrace{\frac{7(1-\phi)}{4D_p \phi^3} \rho v^2}_{\text{Trägheitsverluste}} \right] \quad \text{Gl. 3}$$

Darin:

$v$ : Geschwindigkeit des Gases

$\Phi$ : Porosität des Formstoffes

$\eta$ : dyn. Viskosität des Gases

$\rho$ : Dichte des Gases

$D_p$ : Korndurchmesser

Nach erster Abschätzung der Geschwindigkeitsverteilung konnte man feststellen, dass es zu keiner Turbulenz der Gießgase kommt, so dass nur viskose Verluste auftreten und der zweite Ausdruck der Gleichung vollständig entfällt.



Um den Wärmetransport in der Form abbilden zu können wurde eine mittlere Wärmeleitfähigkeit eingeführt, die sich aus der Wärmeleitfähigkeit des lokal befindlichen Gases und der des Sandes je nach Porosität zusammensetzt (Gl. 3),

$$\bar{\lambda} = \phi \lambda_{gas} + (1 - \phi) \lambda_{sand} \quad \text{Gl. 3}$$

wobei  $\lambda_{sand}$  nicht die Wärmeleitfähigkeit der Form sondern des Formfeststoffes also des Sandes darstellt.

Eine der Impulsgleichung entsprechende Erweiterung der Energiegleichung führt zu einem Ausdruck, indem die Enthalpien der beiden Stoffe gemäß der Porosität aufgeteilt werden, wobei der konvektive Transport durch die bereits korrigierte Geschwindigkeit berücksichtigt wird.

Um die Gasentwicklung in der Form zu berücksichtigen wurden der Kontinuitätsgleichung ebenfalls Quellterme hinzugefügt. Diese Terme stellen temperaturabhängige Massenquellen dar, wobei diese schätzungsweise an eine lineare Abhängigkeit gebunden sind. Für die Gesamtheit der Gase, die im realen Prozess umgesetzt werden, wurden repräsentativ nur ein bzw. zwei Gas-Massenquellen implementiert. Diese mussten in einer iterativen Vorgehensweise so angepasst werden, dass die Gesamtmasse der entwickelten Gase die Gesamtströmung nicht zu sehr beeinflusst. Als funktionale Abhängigkeit wurde näherungsweise eine Rampenfunktion verwendet (Gl. 4),

$$dm''/dt = aT + b \quad \text{Gl. 4}$$

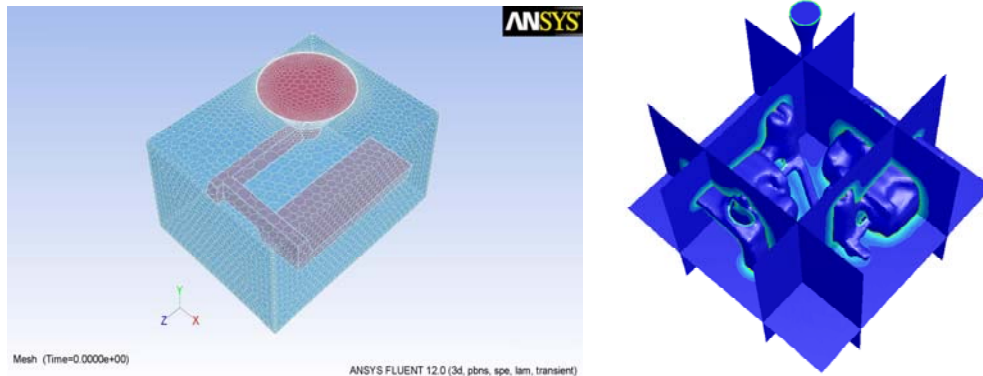
wobei das Freisetzen erst ab einer mittleren Umsatztemperatur  $T_{min} = -b/a$  beginnen soll. Diese wurde hier auf 300°C abgeschätzt.

Als weiteren Punkt des Modells mussten die bereits vorhandenen thermophysikalischen Werkstoffeigenschaften des Formstoffes, so modifiziert werden, dass die Software diese als reine Feststoffeigenschaften aufnimmt. Für die Wärmeleitfähigkeit ergibt sich der in der Gleichung 4 dargestellte Zusammenhang. Für die mit der Dichte gewichteten spezifischen Wärmekapazität ist die Umrechnung entsprechend. Außerdem musste der in diesen Messwerten bereits enthaltene Einfluss der Gasentwicklung durch Glättung der Kurven subtrahiert werden, damit diese nicht zweimal in der Berechnung auftreten.

Es wurden insgesamt vier Gussteilgeometrien Simuliert:

- Standardgeometrie
- Standardgeometrie mit angebauter Kante

- Standardgeometrie im vergrößerten Ausmaß
- Reale Gußteilgeometrie einer Eisengießerei (2 Getriebegehäuse mit Kernsystem)



**Abbildung 28:** Exemplarische Abbildungen von simulierten Formstoffgeometrien

Um die Simulationen möglichst nahe an die real ablaufenden Prozesse anzugleichen, sind folgende Näherungen genutzt worden:

- Porosität des Formstoffs: 40%
- Inhalt der Porositäten: Luft
- Der Boden des Unterkastens und die Seitenflächen wurden als Gasundurchlässig definiert
- Die Simulation startet bei einem mit bereits flüssigem Eisen gefüllten Formkasten
- Die Starttemperatur des Eisen beträgt 1400°C
- Die Starttemperatur des Formstoffs beträgt 20°C
- Ab 300°C wurde eine lineare Gießgasentwicklung innerhalb des Formstoffsystem angenommen
- Das Vorhanden sein von Luftpfefen wurde nicht berücksichtigt

Anhand der oben genannten Geometrien und unter Berücksichtigung der geschilderten Annahmen, wurden folgende physikalische Vorgänge simuliert und prognostiziert:

- Strömungsvektoren der Gase
- Die Entstehung der größten Gasmassenströme
- Der Verlauf der Temperaturfelder innerhalb des Sandsystems
- Die Druckverhältnisse
- Die Wärmeleitungsseigenschaften des Formstoffs

Diese Ergebnisse dienen der Optimierung der Gießgaserfassung am Formkasten in den Versuchen.

#### 4.4 Anwendung der integrierten Maßnahmen in den Gießereien

Im Rahmen des Arbeitspakets 6 sollten die entwickelten Verfahren in Gießereien unter Betriebsbedingungen getestet werden. Untersucht wurden zwei automatisch gefertigte Grünsandformen und zwei handgefertigte Furansandformen. Zur Gießgaserfassung wurde formstabile Aluminiumfolie eingesetzt. Unmittelbar nach dem Abguss wurde der Einguss mit einer Basaltfasermatte abgedeckt und die Aluminiumabdeckung über die Form gelegt. Die Konvertierungsapparatur wurde auf der Abdeckung installiert und unmittelbar darauf gestartet. Die Messungen begannen mit einer Verzögerung von ca. 4 min nach dem Abguss und dauerten eine Stunde an. Dabei wurden die Gase mit einem Probenahmesystem (Edelstahlsonde, Schlauchquetschpumpe (1 L/min)) in Probenbeuteln gesammelt und anschließend analysiert.



**Abbildung 29:** Hochspannungszündvorrichtung in einer Eisengießerei an einer automatisch geformten Grünsandform

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5.7 zusammengefasst. Die Abbildung 28 zeigt exemplarisch den Versuchsaufbau der Hochspannungszündvorrichtung in einer Gießerei.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Gießgaserfassung

Die Erfassung von Gießgasen ist in den einzelnen Gießereibetrieben oft sehr umständlich. Insbesondere in den Bereichen, wo keine Automatisierung eingesetzt wird oder werden kann, ist es häufig schwierig die, durch die Pyrolyse entstehenden, schadstoffbeladenen Gießgase adäquat zu erfassen und im Nachgang zu behandeln.

Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieses Projektes Konzepte entwickelt, mit denen es möglich ist, Gießgase direkt an der Form nahezu vollständig zu erfassen und thermisch zu konvertieren.

#### 5.1.1 Holzeinhausung – Gasfreisetzung nach dem Abguss

Um einen Eindruck zu erhalten, wie sich die Gießgase nach dem Abguss in der Form ausdehnen und in welche Richtung die konvektive Diffusion der Gasteilchen verläuft, wurden im ersten Schritt Holzabdeckungen entworfen, mit deren Hilfe eine atmosphärische Barriere geschaffen wurde. Auf diese Weise war es möglich, festzustellen, wie viel Volumen die entstehenden Gase 1 h nach dem Abguss einnehmen (s. Tab. 3).

Darüber hinaus war es möglich in Versuchen, bei denen zusätzlich ein atmosphärischer Druckausgleich durchgeführt wurde, die Richtung der Gaskonvektion zu ermitteln (s. Tab. 2).

**Tabelle 3:** Gasfreisetzung über 1h nach dem Abguss ohne atm. Ausgleich

Versuchs Nr.	Furansand		
	1	2	3
Volumen Oberkasten	69 L	71 L	70 L
Volumen Unterkasten	53 L	53 L	56 L
Summe	122 L	124 L	126 L

**Tabelle 2:** Gasfreisetzung über 1h nach dem Abguss mit atm. Ausgleich

Messung	Furansand
	1-3
Volumen Oberkasten	124 L
Volumen Unterkasten	4,9 L

Wie der Tabelle 2 zu entnehmen, werden über einen Zeitraum von einer Stunde ca. 124 dm<sup>3</sup> Gas freigesetzt. Die Versuchsergebnisse der in Tabelle 2 aufgeführten Messungen bzgl. der Diffusionsrichtung, zeigen, dass der größte Teil der Gießgase mit 96% am Oberkasten und nur 4% am Unterkasten austreten.

Bei Untersuchungen die erheblich länger andauern als 1 h erwies sich die Holzabdeckung als ungeeignet, da das Holz einer so intensiven thermischen Belastung nicht stand hielt.

#### 5.1.2 Metalleinhausung

Die in Kapitel 5.1.1 erhaltenen Ergebnisse zeigen, dass die Gießgase überwiegend am Oberkasten austreten. Für weitere Versuche, bei denen die Gießgase am Oberkasten

erfasst werden sollen, war es nötig eine Gießgaserfassung zu konzipieren, welche auch über einen ausgedehnten Zeitraum den thermischen Belastungen stand hält.

### 5.1.2.1 Stahl-Abdeckung

Aus den oben im Kapitel 5.1.2 aufgeführten Gründen wurde eine Stahl-Abdeckung gebaut, welche einerseits die Geometrie des Standardkastens abdeckt und andererseits genügend Öffnungen besitzt um die Konvertierungsmethode zu installieren sowie den Abguss zu ermöglichen.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Stahl-Abdeckung im ausreichenden Maße robust und für definierte Formkastengeometrien sehr gut einsetzbar ist.

### 5.1.2.2 Aluminium(folien)-Abdeckung

Bei variierender Formkastengeometrie sind in ihrer Formgebung unveränderliche Abdeckungen, wie die in Kapitel 5.1.2.1 beschriebene Stahl-Abdeckung, zur Gießgaserfassung am Kasten ungeeignet. Um eine Alternative zu finden wurden verschiedene Konzepte auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht. Hierbei zeigte sich, dass glasfaserverstärkte Aluminiumfolie ausreichend robust und darüber hinaus sehr flexibel in ihrer Formgebung und kostengünstig ist. Es ist möglich, mit einfachsten Werkzeugen die Folie den entsprechenden Gegebenheiten anzupassen, um so die Pyrolysegase zu erfassen.

### 5.1.3 Luftpfeife – Gaserfassung nach dem Abguss

Um eine Abdeckung des Formkastens evtl. zu umgehen, wurde die Möglichkeit, die Gießgase mit Hilfe von Luftpfeifen gezielt zu führen, untersucht. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4 zusammengefasst.

**Tabelle 4:** Typische Ergebnisse der Gießgaserfassung mit Luftpfeifen

Versuch	1		2		3			
Volumen Luftpfeife	8 L	14,80%	12,2 L	23,02%	7,7 L (Pfeife 1)	14,50%	9,1 L (Pfeife2)	17,20%
Gesamtvolumen	54 L	100%	53 L	100%	53 L	100%	53 L	100%

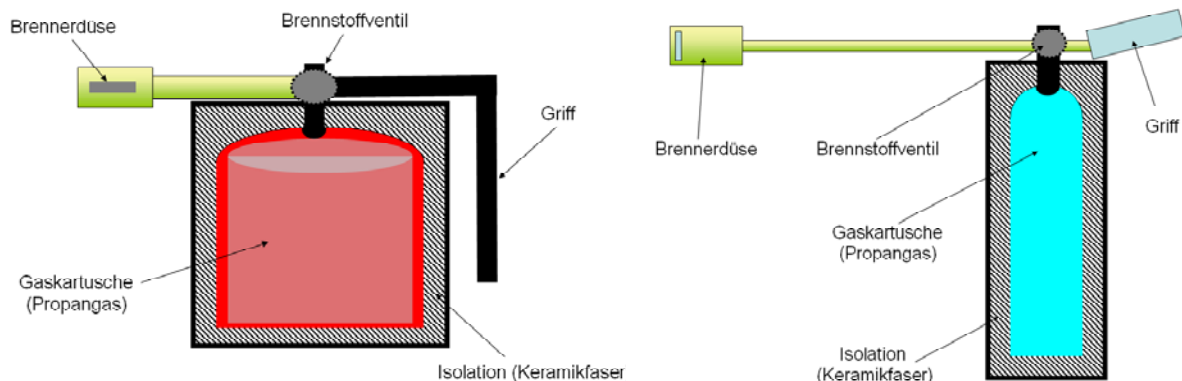
Es wurden mehrere Versuche durchgeführt mit variierenden Pfeifengeometrien. Die Geometrien mit dem besten Wirkungsgrad wurden exemplarisch in der obigen Tabelle aufgeführt. Im Mittel liegt der Erfassungsgrad bei einer Gießpfeife bei ca. 17% gegenüber dem gesamten freigesetzten Gasvolumen. Bei dem mit der Nummer 3 betitelten Versuch wurden zwei Gießpfeifen mit gleicher Geometrie in den Formstoff eingeformt, um herauszufinden, wie viel Gießgas auf diese Weise erfasst werden kann. In der Summe werden 31,7% des Gesamtvolumens und damit nahezu 1/3, der sich bei einem Standardabguss (s. Kap. 4.1.2) bildenden Gase, erfasst.

## 5.2 Konvertierungsmethoden

Wie in der Einleitung bereits angemerkt, werden bei der chemischen Reaktion der Pyrolyse unter reduzierenden Bedingungen im Formstoff nach dem Abguss, Schadstoffe mit physiologisch bedenklichen und umweltbelastenden Eigenschaften gebildet. Die resultierenden Probleme haben gezeigt, dass es nötig ist, wie im Rahmen des durchgeführten Projektes geschehen, Maßnahmen zu entwickeln, mit denen eine Konvertierung dieser gefährlichen Stoffe möglich ist.

### 5.2.1 Gasbrenner

In Vorversuchen zu der vorliegenden Arbeit wurden Sandformen vollkommen eingekapselt und die nach dem Abguss freiwerdenden Gießgase (Kohlenwasserstoffe) an einer definierten Öffnung mit einer sehr heißen Acetylenbrennerflamme mit hohem Wirkungsgrad konvertiert. Diese Art der thermischen Gießgasbehandlung war die Grundlage dafür, einen Brenner zu nutzen, um in den Gießereien eine thermische Oxidation durchführen zu können. Skizzen der, für die Versuche genutzten Brenner, sind in Abbildung 5.1 dargestellt.



**Abbildung 30:** Skizzen der eingesetzten mobilen Gasbrenner

Bei den oben dargestellten Brennern handelt es sich um Modifikationen von gängigen Brennersystemen. Die linke Abbildung zeigt eine Lötlampe, welche normalerweise bei z. B. Wasserleitungsinstallationen eingesetzt wird und die rechte Abbildung zeigt einen Fugenbrenner, der für gewöhnlich zum verbrennen von Unkraut eingesetzt wird. Beide Brenner wurden für den Einsatz in Gießereien bzw. im IfG-Technikum modifiziert (s. Kap. 4.2.4.1).

Typische Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen mit organischem und anorganischem Binder sind in Tabelle 5 aufgeführt.

**Tabelle 5:** Typische Ergebnisse für furanharz- und bentonithaltige Formstoffsysteme

Methode	Formstoffsystem	Zusatzbrennstoff	Wirkungsgrad CO	Wirkungsgrad Benzol	Wirkungsgrad Toluol
Brenner	Furanharz	Propan/Butan	55,50%	44%	36%
Brenner	Grünsand	Propan/Butan	68%	46%	53%

Im Vergleich zeigt das System bei der Konvertierung von Gießgasen, dass ein höherer Wirkungsgrad beim Abguss von bentonitgebundenen Formstoffsystemen gegenüber organisch gebundenen Formstoffen erzielt wird.

### 5.2.2 Gießereifeuerzeug

Im Zuge der Entwicklung einer integrierten Gießgasverbrennung wurden neben den gasförmigen Zusatzbrennstoffen auch flüssige Brennstoffe auf ihre Eignung untersucht. Hierbei standen die Handhabung, die Brenndauer, die Gasfreisetzungsrate, die Verbrennungstemperatur, die Kohlenmonoxidbildung und der Wirkungsgrad im Fokus.

Die für diesen Zweck konzipierte Verbrennungsapparatur (Gießereifeuerzeug, s. Kap. 4.2.4.2) wurde an furanharzgebundenen und bentonitgebundenen Formstoffsystemen getestet. Die erzielten Resultate sind in Tabelle 6 für die Messreihen bei denen Ethanol als Zusatzbrennstoff eingesetzt wurde exemplarisch aufgeführt. Den Untersuchungen nach, erscheint Ethanol, seinen Eigenschaften nach, im Vergleich mit anderen flüssigen Brennstoffen am besten zur Gießgasverbrennung geeignet zu sein.

**Tabelle 6:** Typische Ergebnisse für die Gießgasverbrennung mit dem Zusatzbrennstoff Ethanol

Methode	Formstoffsystem	Zusatzbrennstoff	Wirkungsgrad CO	Wirkungsgrad Benzol	Wirkungsgrad Toluol
Gießereifeuerzeug	Furanharz	Ethanol	21,50%	20,80%	18%
Gießereifeuerzeug	Grünsand	Ethanol	2%	26%	37%

Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren war, dass die entstehenden Gasschübe aus der Form zu einem kurzzeitigen Überschuss an Kohlenwasserstoffen führte und so die Oxidationsreaktion sofort zum Erliegen kam. Dies erklärt auch die mäßigen Konvertierungsraten.

### 5.2.3 Brennkammer

Die Handhabung von flüssigen Brennstoffen direkt an der Gussform in Gießereien kann sich unter Umständen schwierig gestalten und darüber hinaus unmittelbar nach dem Abguss

gefährlich sein. Aus diesem Grund wurden Überlegungen zu Alternativen zum Ethanol als flüssigem Brennstoff angestellt.

Es zeigte sich, dass beim Lösen von Zellulose in Ethanol, bei entsprechend geringer Konzentration, ein Gel gebildet wird, welches beim Verbrennen nahezu identische Eigenschaften, wie reines Ethanol besitzt. Solche Gele werden bereits unter der Bezeichnung „Brennpaste“ für den Einsatz in Warmhalteeinrichtungen vertrieben und wurden im Rahmen der durchgeführten Versuche in einer Brennkammer eingesetzt (s. Kap. 4.2.4.3). Wie in Kapitel 4.2.4.3 beschrieben wurden zwei Brennkammergeometrien mit unterschiedlichen Gasgängen entwickelt. Bei beiden Methoden produziert der Kamineffekt einen Unterdruck, der zum Ansaugen der Gießgase und dem Luftsauerstoff führt. Die Unterschiede im Gasgang führen bei der einen Apparatur dazu, dass der Luftsauerstoff bereits in der Form mit den Gießgasen vermischt wird und bei der andern erst in der Brennkammer. Die Untersuchungen zeigten, dass die Apparatur, bei der die Gießgase in der Brennkammer gemischt werden einen größeren Wirkungsgrad erzielt. Typische Wirkungsgrade für Untersuchungen dieser Methode zur Gießgaskonvertierung an organisch- und anorganischgebundenen Formen sind in der folgenden Tabelle 7 aufgeführt.

**Tabelle 7:** Typische Ergebnisse für die Gießgasverbrennung mit geliertem Ethanol in einer Brennkammer

Methode	Formstoffsystem	Zusatzbrennstoff	Wirkungsgrad CO	Wirkungsgrad Benzol	Wirkungsgrad Toluol
Brennkammer	Furanharz	Brennpaste	28%	15%	32%
Brennkammer	Grünsand	Brennpaste	22,10%	11%	14%

#### 5.2.4 Hochspannungszünder (HSZ)

Die bereits beschriebenen Gasschübe (s. Kap. 5.2.2), welche zu einer Unterbrechung der Oxidationsreaktion führen, führten zu einem Umdenken bei der Weiterentwicklung der Konvertierungsmethoden, so dass ein Hochspannungszünder entwickelt wurde (s. Kap. 4.2.4.4).

**Tabelle 8:** Exemplarische Wirkungsgrade für die Methode des Hochspannungszünders (HSZ)

Methode	Formstoffsystem	Wirkungsgrad CO	Wirkungsgrad Benzol	Wirkungsgrad Toluol
HSZ-Vorrichtung	Furansand	2%	<1%	<1%
HSZ-Vorrichtung	Grünsand	42%	47%	28%
HSZ-Vorrichtung	Grünsand	57%	28%	38%



Diese Methode wurde, wie die Übrigen auch, an organisch und anorganisch gebundenen Formstoffsystemen getestet. Die besten Resultate (s. Tabelle 8) wurden hierbei mit bentonithaltigen Formstoffsystemen erzielt.

### 5.2.5 Kohlendioxid-Bilanz

Bei den oben aufgeführten Methoden geht es darum, die Schadstoffbestandteile der Gießgase mit und ohne Zusatzbrennstoff nahezu vollständig in die Oxidationsprodukte der Kohlenwasserstoffe  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  zu konvertieren. Aus experimenteller Beobachtung ist bekannt, dass bei einem zu erwartenden Volumenstrom von  $0,175 \text{ m}^3/\text{h}$  an der Formoberfläche ca.  $0,8 \text{ kg/h}$  an  $\text{CO}_2$  emittiert werden. Unter Berücksichtigung der Verbrennungsgase der neuen Methoden werden die in der unten aufgeführten Tabelle angegebenen zusätzlichen  $\text{CO}_2$ -Emissionen erwartet.

**Tabelle 9:** Kohlendioxid-Bilanz

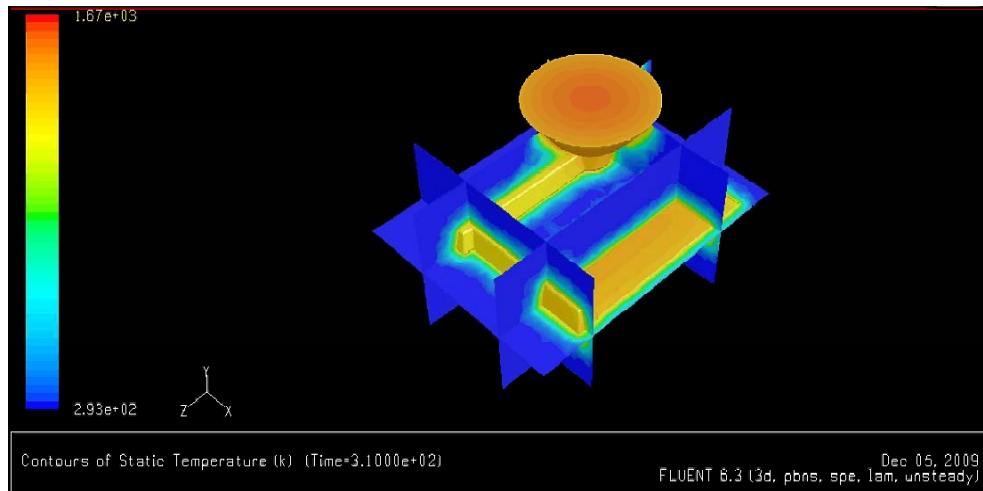
Methode	Ergänzende $\text{CO}_2$ -Menge [g/h]	$\text{CO}_2$ -Gesamtmenge [g/h]
<b>Gießereifeuerzeug</b>	336	1136
<b>Brennkammer</b>	528	1328
<b>Brenner</b>	576	1376
<b>Hochspannungs-zündvorrichtung</b>	0	800

Die Gesamtemissionen liegen mit  $800 \text{ g}$  bis  $1400 \text{ g}$  in Größenordnungen, die im Vergleich zu anderen Methoden gut vertretbar sind.

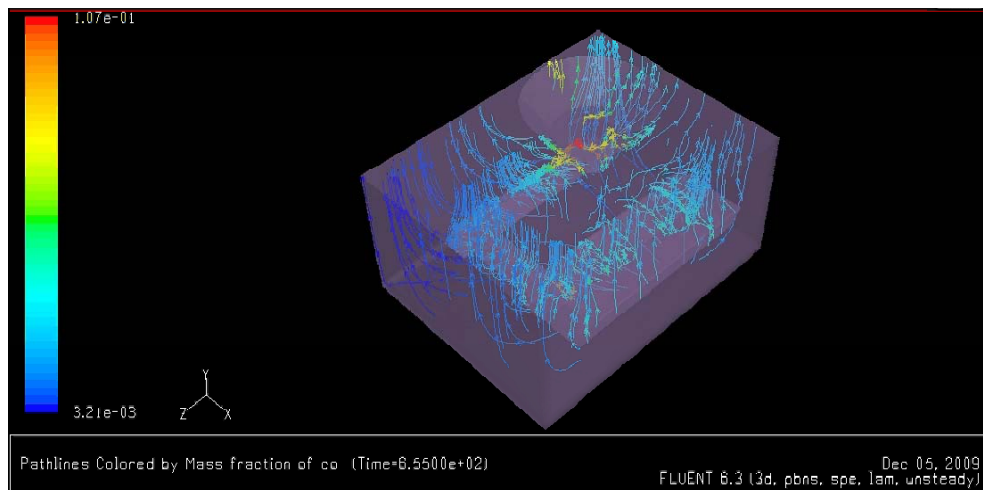
Bei einem hypothetischen Szenario zum Beispiel, bei dem das Gießgas über das Hallendach abgesaugt und einer Nachverbrennung zugeführt wird, müsste bei einem typischen Volumenstrom von  $84.000 \text{ m}^3/\text{h}$  mit einer Ergänzenden  $\text{CO}_2$ -Menge von  $6700 \text{ kg/h}$  gerechnet werden. Dies entspräche einer  $\text{CO}_2$ -Gesamtmenge von ca.  $20.000 \text{ kg/h}$ .

## 5.3 Simulation

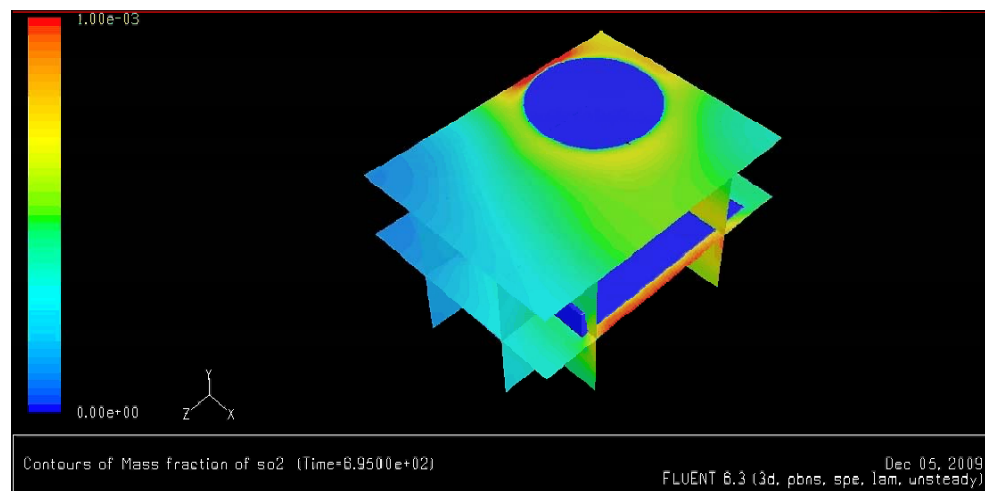
Ein wesentlicher Bestandteil der durchzuführenden Arbeiten bestand darin, die Wärmefront und die Gießgasströmungen in der Form mit Hilfe von diversen Computerprogrammen zu simulieren (s. Kap. 4.3). Einige der erzielten Ergebnisse sind hier am Beispiel der im IfG-Technikum eingesetzten Standardgeometrie aufgeführt.



**Abbildung 31:** Simulation der Temperaturfrontausdehnung



**Abbildung 32:** Simulation der CO-Diffusion im Formstoff



**Abbildung 33:** Simulation der Gasemission am Oberkasten am Beispiel von SO<sub>2</sub>

Die computergestützten Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Hilfe der Simulationstechnik die Anpassung der Gießgaserfassung an die entsprechende Form- bzw. Kasten geometrie erheblich effizienter ausfällt. Durch die Prognose der Zeit und der Gießgaskonvektion wird eine Steigerung der Erfassungseffizienz möglich. Für eine

Beschreibung der detaillierten Vorgänge ist es jedoch notwendig die einzelnen Reaktionsmechanismen genau zu kennen und in die Software als Unterrouinen zu implementieren.

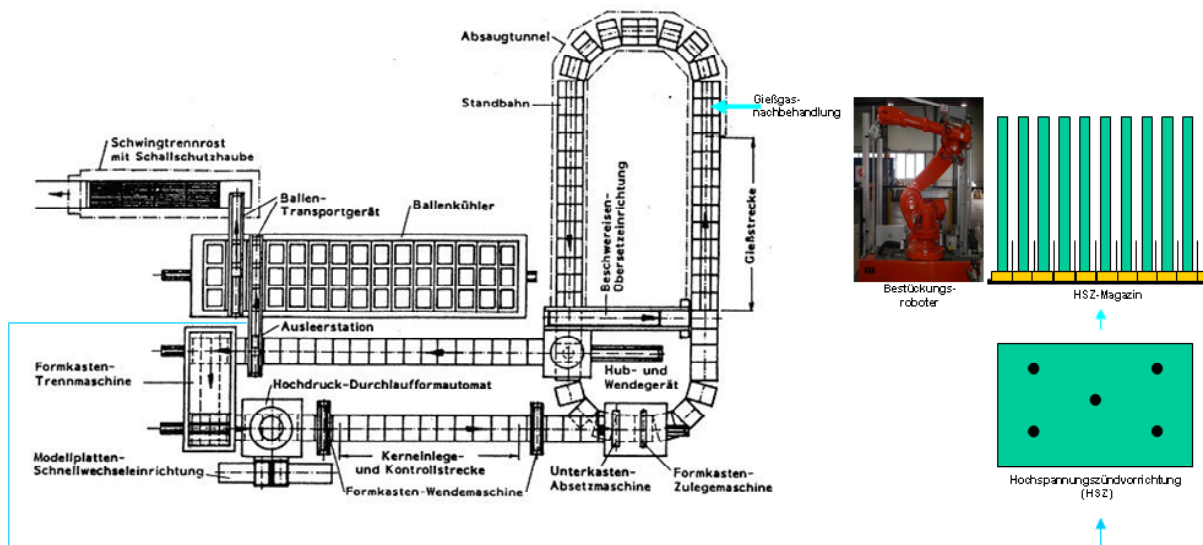
## **5.4 Untersuchungen in den Gießereien**

Die Untersuchungen bezüglich dem Wirkungsgrad und der Praktikabilität der einzelnen Methoden wurden überwiegend im IfG-Technikum unter betriebsnahen Bedingungen durchgeführt. Um die Akzeptanz, die Effizienz und die Handhabung der Favorisierten Methoden im laufenden Betrieb zu testen, wurden Untersuchungen in Gießereien durchgeführt.

### **5.4.1 Prüfung und Bewertung der Abgasbehandlungsmethoden durch die Gießereien**

Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes wurden persönliche Gespräche mit den Gießereibetreibern und Besichtigungen der Gießereien durchgeführt. Hierbei wurde geklärt, ob und wie in Zukunft die entwickelten Maßnahmen eingesetzt werden können. Ein Beispiel für den Einsatz des Hochspannungszünders in Gießereien im Bereich der automatischen Formerei ist in Abbildung 34 schematisch dargestellt.

Bei dem in der Skizze dargestellten Automatismus zur Formherstellung handelt es sich um ein, in der Gießereiindustrie weit verbreitetes, Verfahren, welches grundsätzlich in der dargestellten Weise zum Einsatz kommt. Wie der Skizze zu entnehmen ist, werden im ersten Schritt Grünsandformen hergestellt. Dies umfasst die gesamte Formstoffgeometrie inklusive der Kerne. Im zweiten Schritt werden die Formen entlang der Gießstrecke abgegossen. Im dritten Schritt werden die Abgegossenen Formen auf die, in der Regel eingehausten Rollenbahn der Kühlstrecke gefahren. An diesem Punkt, soll die neue Hochspannungszündmethode zum Einsatz gebracht werden. Vor dem Einfahren des Kastens in den Absaugtunnel legt ein Roboterarm eine aus einem Magazin entnommene Platte mit integriertem Hochspannungszünder automatisch auf die Formstoffoberfläche. Mit Hilfe der Platte werden die Gießgase effizient erfasst und kanalisiert. An der Austrittsöffnung(en) werden diese dann entzündet.



**Abbildung 34:** Schematische Skizze einer automatischen Formanlage mit integrierter Gießgasverbrennung (HSZ), Kühlstrecke und Ausleerstation

Bei diesem Vorgang wird die Ionenkonzentration gemessen, so dass ein Erlischen der Gießgasflamme sofort detektiert werden kann, um mit der Generierung eines Zündfunken die Verbrennung wieder neu zu starten. Auf diese Weise ist es möglich, die Kapazität der eingesetzten Akkumulatoren sehr klein zu halten und die damit verbundenen Energiekosten zu minimieren. Die Konvertierung wird bis zum Erreichen der Ausleerstation (Schritt vier) durchgeführt. Unmittelbar vor dem Ausleeren des Kastens wird die Platte automatisch entfernt und ins Magazin zurückgeführt. Dort werden die Akkumulatoren bei Bedarf über z. B. induktive Verfahren aufgeladen.

#### 5.4.2 Einsatz der Konvertierungsmethoden in einer Gießerei

Nach ausgiebiger Prüfung der Konvertierungsverfahren und durch die intensive Zusammenarbeit mit den Gießereien, war es möglich, die entwickelten Konvertierungsmethoden in einem ausgewählten Betrieb zu testen.

**Tabelle 10:** Resultate der Gießereiuntersuchungen

Methode	Formstoffsystem	Zusatzbrennstoff	Wirkungsgrad				
			CO	FID	Benzol	Toluol	Xylol
Brenner	Furanharz	Propan/Butan	93%	94%	98%	92%	40%
HSZ-Vorrichtung	Grünsand	-	76%	79%	82%	70%	83%

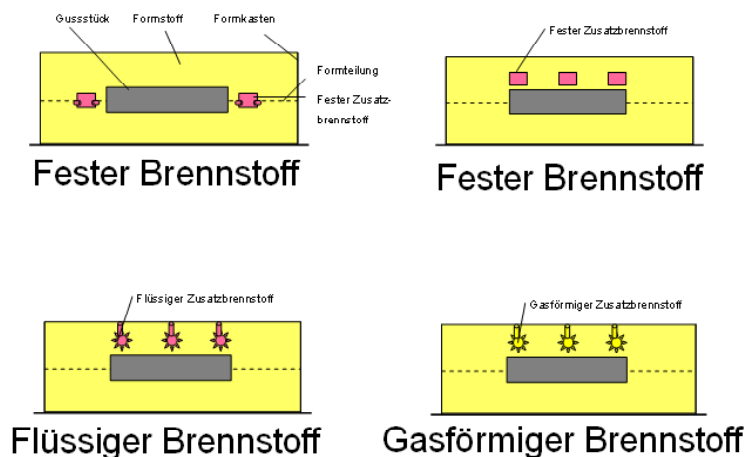
Die entwickelten Methoden wurden an automatisch geformten Grünsandformen und handgeformten Furanharzformen getestet. Wobei das Gießgas der Furanharzform mit dem Brenner konvertiert und die Gießgase der Grünsandform mit dem Hochspannungszünder gezündet wurden. Die Ergebnisse sind in der obigen Tabelle 9 aufgeführt.

## 6 Diskussion

Ausgangspunkt für dieses Projekt, zur Weiterentwicklung einer „integrierten Gießgasverbrennung“, waren die von der DBU geförderten Arbeiten der Firma Climarotec sowie die Resultate der Diplomarbeit von Herrn Fleißner [8]. Die in diesem Zusammenhang durchgeführte thermische Oxidation von Gießgasen ließ die Frage aufkommen, ob es grundsätzlich möglich ist eine integrierte Gießgasverbrennung mit Zusatzbrennstoffen zu entwickeln.

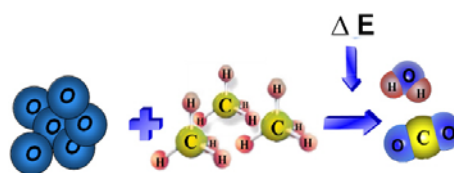
### 6.1 Mögliche Zusatzbrennstoffe in der Form

Um geeignete Zusatzbrennstoffe zu bestimmen, wurden diese zunächst nach ihrem Aggregatzustand in fest, flüssig und gasförmig kategorisiert. Der mögliche Einsatz dieser Brennstoffe ist in Abbildung 35 schematisch dargestellt.



**Abbildung 35:** Kategorisierung der Zusatzbrennstoffe und der geplante Einsatz in der Form

Die zu untersuchenden Kohlenwasserstoffe wurden entsprechend der geschilderten Systematik auf ihren Einsatzbereich geprüft. Es wurden Feststoffe, wie z. B. Parafin im Rahmen von Vorversuchen eingeformt und auf ihre Wirksamkeit getestet. Für die angestrebte Oxidationsreaktion



sind zwei Dinge essentiell. Zum einen muss die Aktivierungsenergie ( $\Delta E$ ) und zum anderen müssen die Reaktionspartner (Kohlenwasserstoff, Sauerstoff) in stöchiometrischen Verhältnissen bereitstehen, damit die Reaktion ablaufen kann. Die Beobachtungen zeigen,

dass keine der Eingeformten Brennstoffe (fest, flüssig) an der Formstoffoberfläche gezündet werden konnte oder dauerhaft verbrannte. Dies wird darauf zurückgeführt, dass nicht genügend Sauerstoff für die exotherme Oxidation zur Verfügung stand. Darüber hinaus verblieben Reste der Zusatzbrennstoffe, wegen der unvollständigen Verbrennung, im Formstoff, so dass es bei der Sandaufbereitung zu Problemen kommen würde.

Des Weiteren führen die Gasfreisetzungsraten beim Überschreiten des Siedepunkts zu einer starken mechanischen Beanspruchung des Formstoffs. Das Große Volumen, welches das sich rasch ausdehnende Gas des Zusatzbrennstoffs bei einem möglichen Kontakt mit flüssigem Metall sprunghaft einnehmen würde, würde mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer Explosion führen.

Wegen des geschilderten Gefährdungspotentials und der nur unzureichenden Oxidation der Gießgase an der Formstoffoberfläche wurde im weiteren Projektverlauf darauf verzichtet weitere Untersuchungen an eingeformten Zusatzbrennstoffen durchzuführen.

## 6.2 Gießgaserfassung

Damit die Gießgase effizient verbrannt bzw. nachbehandelt werden können, bedarf es einer gezielten Gießgaserfassung. Wie die Untersuchung der Gießgasdiffusion im Kasten zeigt (s. Kap. 5.1.1 u. 5.3), entweichen bei abgedichteter Teilungsebene bis zu 96 % der Gase am Oberkasten. Dies bedeutet, dass der größte Teil der Gießgase durch eine Abdeckung des Oberkastens erfasst werden kann. Wegen einer nur mangelhaften thermischen Belastbarkeit, wurden die Holzabdeckungen durch Metallabdeckungen substituiert. Entsprechend den Abmessungen der Standardform wurde eine Stahlabdeckung entworfen, an der die unterschiedlichen externen Konvertierungsmöglichkeiten getestet werden konnten (s. Kap. 4.2.2.2). Der Vorteil einer solchen Metalleinhausung besteht darin, dass diese auch für den Einsatz in Gießereien ausreichend robust ist. Der Nachteil ist, dass eine aus Stahl gefertigte Abdeckung von ihrer Geometrie festgelegt ist und so die Gießgaserfassung nur an einem bestimmten Kastentyp zulässt.

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Abgussuntersuchungen überwiegend mit der Standardkastengeometrie im IfG-Technikum durchgeführt. Allerdings wurden auch Untersuchungen an Kastengeometrien durchgeführt, die sich von der Standardform unterschieden. Damit in einem solchen Fall eine Gießgaserfassung möglich war, musste eine Alternative zur Stahlabdeckung gefunden werden. Diese musste ausreichend flexibel sein, um unterschiedlichste Formgeometrien abdecken zu können, aber auch ausreichend robust, um den thermischen Belastungen widerstehen zu können. Es wurden unterschiedlichste Materialien bzgl. ihrer Anwendbarkeit geprüft, wie z. B.

aluminiumbeschichtete Kunststofffolien, silikonbeschichtete Basaltfasermatten und Andere, und es zeigte sich, dass eine glasfaserverstärkte Aluminiumfolie für den vorgegeben Zweck am besten geeignet ist.

## 6.3 Konvertierungsmethoden

Nachdem die Gießgaserfassung durch die Entwicklung entsprechender Erfassungssysteme sichergestellt war, konnten die Methoden zur thermischen, oxidativen Nachbehandlung der Pyrolysegase unter betriebsnahen Bedingungen im IfG-Technikum getestet werden.

### 6.3.1 Gießereifeuerzeug

Wie die oben geschilderten Untersuchungen zeigen, erwies sich der Einsatz von Zusatzbrennstoffen in der Form als ungeeignet und zu gefährlich. Aus diesem Grund wurde nach Methoden gesucht, mit denen eine thermische Konvertierung außerhalb der Form möglich ist. Im Rahmen einer solchen Maßnahme wurden die Gießgase mit Hilfe einer Abdeckung erfasst und im Nachgang an einer zentralen Ausgangsöffnung mit flüssigem Zusatzbrennstoff verbrannt. Die hierfür entwickelte Apparatur (s. Kap. 4.2.4.2 u. 5.2.2) wurde Gießereifeuerzeug genannt.

Bei dieser Apparatur handelt es sich um einen offenen Hohlzylinder, der auf halber Höhe mit einem Glasfaserdochtgeflecht durchzogen ist. Die Enden der Dichte ragen in einen, den Zylinder umschließenden, mit flüssigem Brennstoff gefüllten Vorratsbehälter. Zur Stabilisierung der Apparatur wurde eine Bodenplatte am Zylinder angebracht. Der resultierende Kamineffekt führt zu einem Unterdruck am Einlass der Apparatur, so dass die Gießgase angesaugt werden. Das Funktionsprinzip dieser Apparatur wird ausführlich in Kapitel 4.2.4.2 geschildert.

Wie die Ergebnisse in Kapitel 5.2.2 zeigen, erlischt die Flamme des Feuerzeugs regelmäßig, wegen der inhomogenen Gießgaszusammensetzung und der unkontrollierten Gasschübe. Dieser Nachteil zeigt sich im besonderen Maße bei Untersuchungen an bentonitgebundenen Formstoff. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die thermische Energie des heißen Metalls nach dem Abguss zu einer Wassergasreaktion des im Formstoff enthaltenen Wassers mit den Kohlenstoffträgern führt. Der so entstandene Wasserstoff diffundiert durch den Formstoff und reagiert mit der heißen Flamme des Gießereifeuerzeugs spontan. Die resultierende Verpuffung löscht die Flamme des Feuerzeugs und die Konvertierungsreaktion endet. Dem entsprechend ist diese Methode zur thermischen Konvertierung der Gießgase, die beim Abguss von Grünsandformen entstehen, ungeeignet.

Die Methode wurde an organischgebundenen Formstoffsystemen mit und ohne Kerne weiter erprobt. Dabei kommt es, durch die Exothermie der Oxidationsreaktion bei Formen, die große Mengen an Kohlenwasserstoffen emittieren, dazu, dass sich das Feuerzeug stark aufheizt. Durch diesen Effekt erwärmte sich auch der flüssige Zusatzbrennstoff und verdampfte damit im erhöhten Maße. Die austretenden Dämpfe sind hoch reaktiv und führen in Verbindung mit dem Luftsauerstoff zu einer unkontrollierten Verbrennung auch an der Außenseite der Apparatur. Der Wirkungsgrad ist in einem solchen Fall außerordentlich niedrig und konnte, weil an dieser Stelle der Versuch abgebrochen werden musste, nicht zuverlässig bestimmt werden. Auch die, aus diesem Umstand resultierende Modifikation des Gießereifeuerzeugs, durch Isolationsmaßnahmen (s. Abb. 24), führte nur zu einem Teilerfolg. Die Versuchsdauer konnte zwar gesteigert werden, aber nicht auf den gesamten Zeitraum der Kohlenwasserstoffemission ausgedehnt. Aus diesem Grund ist die Methode der Gießgaskonvertierung mit einem „Gießereifeuerzeug“ nur sehr eingeschränkt und unter speziellen Rahmenbedingungen möglich.

### 6.3.2 Brennkammer

Wegen den in Kapitel 6.1 und 6.3.1 beschriebenen Schwierigkeiten im Umgang mit flüssigen Brennstoffen unter betriebsnahen Bedingungen und davon abgeleitet auch in den Betrieben, musste eine Alternative für den Fall gefunden werden, in dem der Einsatz von flüssigen Zusatzbrennstoffen unmöglich ist.

Die Ergebnisse der Untersuchung der flüssigen Zusatzbrennstoffe im Labor haben gezeigt, dass Ethanol die für die thermische Oxidation wesentlichen Eigenschaften besitzt. Aus diesem Grund wurde ein ethanolisches Gel als alternativer Zusatzbrennstoff sowie als Grundlage für die Entwicklung einer Brennkammer eingesetzt. Die bis dahin gemachten Untersuchungen zeigten, dass eine gute Durchmischung der Gießgase mit Luftsauerstoff für einen hohen Wirkungsgrad der Oxidationsreaktion entscheidend ist. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse wurden zwei Brennkammern, wie sie in Kapitel 4.2.4.3 beschrieben sind, entwickelt. Der Vergleich der beiden Methoden zeigte, dass die Brennkammer, bei der die Gießgase unmittelbar vor der Verbrennung, außerhalb des Formstoffs mit dem Luftsauerstoff gemischt wurden, einen größeren Wirkungsgrad besitzt.

Ein großer Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sich der Umgang mit dem Brennstoff als außerordentlich unkompliziert erweist. Da die Brennpaste schon vom Hersteller in Dosen Abgepackt ist, ist der Austausch, nach dem Verbrauch des Zusatzbrennstoffs, sehr einfach. Die leere Dose muss nur durch eine neue ersetzt werden und die Brennkammer kann wieder zur Konvertierung der Gießgase eingesetzt werden.

Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich auch bei dieser Methode, zwar nicht so ausgeprägt wie beim Gießereifeuerzeug, aber auch auffallend, dass die Gießgase, welche



beim Abguss von Grünsandformen entstehen, zu Verpuffungen neigen. Dies führte zum Teil, ähnlich wie beim Gießereifeuerzeug auch, zu einem Abbruch der Oxidationsreaktion. Aus diesem Grund sollte diese Methode überwiegend zur Konvertierung von Gießgasen, die durch die thermische Belastung organischgebundener Formstoffe entstehen, eingesetzt werden.

### 6.3.3 Hochspannungszünder

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurden unter Anderen die Konzentrationen der gasförmigen Kohlenwasserstoffe bestimmt. Auffällig ist in diesem Zusammenhang, dass, vorausgesetzt der Luftsauerstoff steht im stöchiometrischen Verhältnis zur Verfügung, ein brennbares Gemisch vorliegt. Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, unterliegen die Kohlenwasserstoffemissionen gewissen Schwankungen, so dass das Gemisch seine Zusammensetzung zu Ungunsten der Brennbarkeit verändert oder zu Verpuffungen bei den oben aufgeführten Methoden führt. In beiden Fällen würde die exotherme Reaktion aus den genannten Gründen beendet. Damit fehlt der Reaktion die Aktivierungsenergie ( $\Delta E$ , s. Kap. 6.1) um bei entsprechender Gießgaskonzentration neu zu starten.

Diese Beobachtungen waren der Anlass eine Methode zu entwickeln, welche ausschließlich die benötigte Aktivierungsenergie zum Start der Oxidationsreaktion und keine Zusatzbrennstoffe bereit stellt. Hierbei wird mit Hilfe von Hochspannung ein Zündfunke generiert, der wenn es erforderlich ist die brennbaren Gießgase entzündet. Auf diese Weise ist es möglich, auf zusätzliche Brennstoffe zu verzichten.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen allerdings (s. Kap. 5.2.4), dass diese Methode nur zur Konvertierung von Gießgasen geeignet ist, die beim Abguss von Grünsandformen entstehen. Es wird vermutet, dass die Oxidation des sich bildenden Wasserstoffs zu einem größeren Energieeintrag führt und dem entsprechend zu einer besseren Oxidation der Kohlenwasserstoffe.

Die Vorteile dieser Methode sind geringer Wartungsaufwand, geringe Abmessungen, geringe Kosten, unkomplizierte Handhabung bei einem guten Wirkungsgrad. Diese Methode eignet sich hervorragend für den Einsatz in automatisierten Formverfahren und kann wegen der geringen Abmessungen über die Abkühlphase in der Kühlstrecke mitlaufen.

### 6.3.4 Brenner

Mit der Modifikation von handelsüblichen Brennern, wie in Kapitel 4.2.4.1 beschrieben, war es möglich die gefassten Gießgase gezielt zu verbrennen. Wegen der hohen Temperaturen die partiell in Gießereien auftreten und sich nicht verhindern lassen, wurden die Brenner thermisch isoliert. Dies war nötig, um einem starken Druckanstieg (bis über die Belastungsgrenze) in den Vorratsbehältern vorzubeugen. Da diese Systeme bereits eine

optimierte Brenngaseindüsung besitzen, konnte die Zugabe des gasförmigen Zusatzbrennstoffs an die entsprechenden Versuchsbedingungen angepasst werden. Hierbei war es wesentlich den Gasverbrauch so gering wie möglich zu halten, aber auch soviel Zusatzbrennstoff zur Verfügung zu stellen, dass die Verbrennungsreaktion nicht unterbrochen wird. Zu Beginn der Messreihen mit bentonithaltigen Formstoffen wurde die Funktion der Brenner durch Gasschübe und der resultierenden Verpuffung gestört, so dass die Brennerflamme erlosch. Durch Erhöhung der Brenngaszufuhr konnte dieses Problem beseitigt und der Wirkungsgrad der Konvertierung gesteigert werden.

Die Vorteile dieser Methode sind geringer Wartungsaufwand, der benötigte Zusatzbrennstoff ist in vielen Gießereien bereits verfügbar, geringe Kosten und eine unkomplizierte Handhabung bei sehr gutem Wirkungsgrad.

## **6.4 Prüfung der Verfahren in Gießereien**

Die Gespräche mit Gießereibetreibern haben gezeigt, dass die entwickelten Verfahren durchaus das Potential haben, sich in den Gießereien zur integrierten Abgasbehandlung zu etablieren. Dabei ist allerdings die Vielfältigkeit der Betriebe zu beachten. Dies bedeutet, dass keine der Methoden so entwickelt wurde, dass diese ohne eine entsprechende Anpassung an die speziellen Gegebenheiten, eingesetzt werden kann. Aus diesem Grund wurde bei den Begehungen geprüft, welche der entwickelten Methoden zur Gießgaskonvertierung jeweils eingesetzt werden kann und welche Anpassungen in diesem Zusammenhang notwendig werden.

## 7 Fazit

Die in diesem Bericht vorgestellten Methoden zur oxidativen Gießgaskonvertierung verstehen sich, jede für sich genommen, als Teil eines Maßnahmenpakets, welches im Bedarfsfall geschnürt werden kann. Jede dieser Methoden ist in der Lage die Gießgasemission zu reduzieren. Allerdings nur im Rahmen der beschriebenen Einschränkungen. Durch die Kombination der entwickelten Konvertierungsmethoden ist es jedoch möglich, für nahezu jeden Bedarfsfall eine Lösung zur Reduktion der Gießgasemissionen zu generieren.

Es gibt eine Lösung für Formen in Bewegung (z. B. Formanlagen) und für stationäre Formen (z. B. Kaltharzverfahren).

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Helber, J.; Wolf, G.: Gießereigerüche – Eine Bestandsaufnahme, Giesserei 87 (2000) Nr. 9, S. 46-53
- [2] Helber, J.; Wolf, G.: Geruchsminimierung an Gießstrecken ( – Teil I) F & E-Projekt (E 265), AiF-Nr. 11725 N
- [3] Helber, J.; Wolf, G.: Minimierung von Geruchsemission an Gießstrecken ( – Teil II) F & E-Projekt (E 306), AiF-Nr. 14585 N / 1
- [4] Helber, J.; Wolf, G.: Entwicklung umweltfreundlicher Gießereiprozesse gestützt auf ein zentrales Transferzentrum), F & E-Projekt (P 329), BMBF-Nr. 01 RW 0311
- [5] Reinigen von Gießgasen mit einem Niedertemperaturkatalysator F & E-Projekt (E 379), AiF-Nr. 15728 BG, laufendes Vorhaben
- [6] Helber, J.; Prömper, H.; Wolf, G.: Gießereigrüche – Eine Bestandsaufnahme, Teil 2 Giesserei 88 (2001) Nr. 6, S. 86-94
- [7] Entwicklung einer Messmethode zur Bestimmung von Geruchsbelastungen durch Kondensate, F & E-Projekt (E 388), AiF-Nr. 16080 N/1, laufendes Vorhaben
- [8] Fleißner, M: Reduzierung von Schadstoff-Emissionen beim Sandguss von Gusseisen Diplomarbeit FH Giessen Friedberg 2005
- [9] Grefhorst, C.; Sinsen, D. M.: Geruchs- und Schadstoff- Emissionsreduzierung mit selektierten und modifizierten Bentoniten, Gießereierfahrungsaustausch 06 (2004) 39-42
- [10] Shih, T.-S.; Hwang, L.-R.; Hwang M.-Y.: Transaction of The American Foundrymen's Society 96 (1966) S. 825-836
- [11] McKinley, M. D.; Lytle, C. A.; Bertsch, W: Pyrolysis of Core Resins uses in Metalcasting, Transaction of The American Foundrymen's Society 41 (1999) S. 407-412
- [12] Winterhalter, J.; Bautz, H.; Siefer, W.: Spalt- und Reaktionsprodukte organischer Formstoffbestandteile in Gießgasen, Gießereiforschung 41 (1989) Heft 2, S. 66-76
- [13] Krill, H.: VOC Control technology - An Overview, in: Sixth Seminar on Control Technology for Emissions from Stationary Sources, Budapest, Hungary, 14. – 17.10.1996
- [14] Bruijnes, C.; Duesmann, H.: Progress in Implementing Volatile Organic Compound Control Measures, in: Sixth Seminar on Control Technology for Emissions from Stationary Sources, Budapest, Hungary, 14. – 17.10.1996

## 9 Anhang

## Anhang A – Exemplarisches Versuchsprotokoll

Formprotokoll - Kernherstellung	
Datum	14.10.2009
Projekt	P-385
Versuchsnummer	V40
Bearbeiter	Spenner / Lammert
Geometrie	Kernkasten E-379
Formstoffsystem	Cold-Box
Harz - Bezeichnung	HA GT 8000
Härter (Säure/Aktivator) - Bezeichnung	HA GT 8050
Additiv - Bezeichnung	
Gasharz	120g auf 15kg Sand
Aktivator	120g auf 15kg Sand
Additiv - Menge	
Art der Zugabe	Parallel zugegeben
Begasung mit:	4 cm <sup>3</sup> Amin GH6
Begasungszeit	10s
Begasungsdruck	
Begasungsmenge	4 cm <sup>3</sup>
Sand - Bezeichnung	F32
Sand - pro Mischung [kg]	15
Mischzeit pro Mischung [s]	60
Mischer - Typ	Wirbelmischer
Aushärtezeit pro Kern [h]	24
Kerne gesamt	4
Lagerungszeit der Kerne [h]	24
Kerngewicht pro Kern [kg]	0,84
Kernherstellungsverfahren	
Schießdruck	
Sandtemperatur	

Verwendete Materialien	
Speiser	keine
Eingusshülsen	keine
Gießfilter	keine



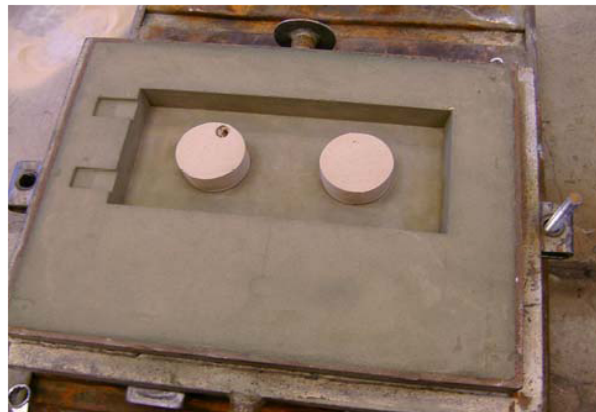
Technikum Duisburg

Friedrich-Ebert-Straße 12

47119 Duisburg

Andre Lötschert: 0172/4080291

Umweltdaten	
Standort	Halle
Luftdruck [hPa]	1018
Luftfeuchtigkeit [%]	18
Temperatur [°C]	20



Bemerkungen
Mit der UNI-Kernschießanlage hergestellt

Formprotokoll	
Datum	15.10.2009
Projekt	P-385
Versuchsnummer	V40
Bearbeiter	Lammert / Spenner
Geometrie	P-329
Formgrundstoff	Kreislauf GF
Bentonit - Bezeichnung	Kreislauf GF
Wasser- Bezeichnung	Leitungswasser
Glanzkohlenstoff- Bezeichnung	Kreislauf GF
Sand - Menge pro Mischung [kg]	150
Bentonit - Menge pro Mischung [g]	
Wassergehalt pro Mischung	3,80%
Sonstige Zusätze	
Sand - pro Mischung [kg]	150
Mischzeit pro Mischung [s]	60
Mischer - Typ	Wirbelmischer
Formverfahren	Rüttelpress
Thermoelemente pro Form	4
Formen pro Abguss	1
Lagerungszeit bis zum Abguss [h]	Abguss am selben Tag
Sandgewicht pro Form [kg]	150
Sandgewicht gesamt (kg)	150



## Technikum Duisburg

Friedrich-Ebert-Straße 12

47119 Duisburg

Andre Lötschert: 0172/4080291

Umweltdaten	
Standort	Halle
Luftdruck [hPa]	1025
Luftfeuchtigkeit [%]	26
Temperatur [°C]	16



Bemerkungen
4 Coldbox Kerne geschossen: 844g, 845g, 816g, 832g

Verwendete Materialien	
Speiser	
Eingusshülsen	
Gießfilter	

Schmelzprotokoll	
Datum	15.10.2009
Projekt	P-385
Versuchsnummer	V 40
Bearbeiter	Lammert / Spenner
Schmelzmasse [kg]	40
Gussteilbezeichnung	Modell P-329
Gussteilgewicht (gesamt) [kg]	ca. 30
Abstiche	2
Schmelzmasse pro Abstich [kg]	40
Ofen-Typ	Induktionsofen
Ofen-Stromverbrauch	Eingeschaltet
	Ausgeschaltet
	Gesamt
Gasverbrauch [m³]	Brenner an
	Brenner aus
	Gesamt
Abstichtemp. [°C]	1410 und 1410
Abgusstemp. [°C]	1400
Pfanne: Typ	klein
Ofen an um:	
Abstich um:	
Gießzeit	
Mg - Behandlung	
Impfverfahren	
Impfmittel	
Abdeckspäne	
Chemische Endanalyse	Siehe Gätierungs-berechnung



Technikum Duisburg

Friedrich-Ebert-Straße 12

47119 Duisburg

Andre Lötschert: 0172/4080291

Versuchsziel
Ziel war es die FID und Gasanalyser und BTX Werte online zu Messen um die Funktionsweise eines neu entwickelten "Hochspannungszünders" zu ermitteln. Der Gasgeschwindigkeit sollte auf 5m/s eingestellt werden und es wurden jeweils 2 Cold-Box-Kerne eingelegt.

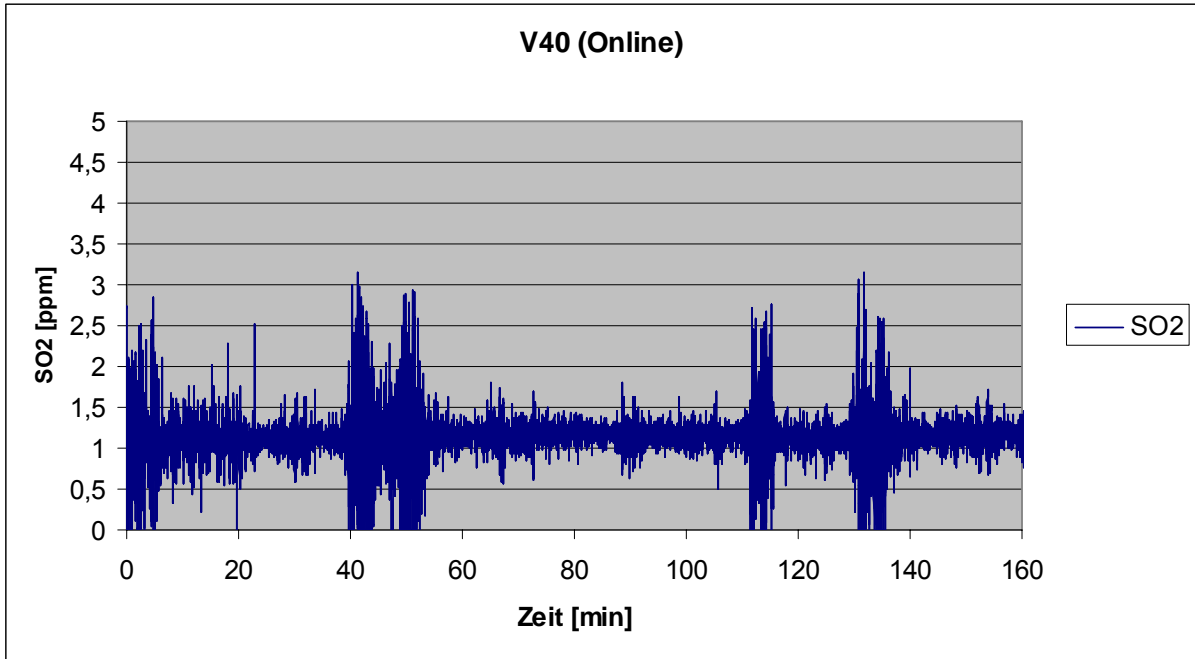
Thermische-Analyse	
Messprogramm	
Thermoelemente pro Form	
Messintervall	
Messdauer	
Start / End-Temperatur	



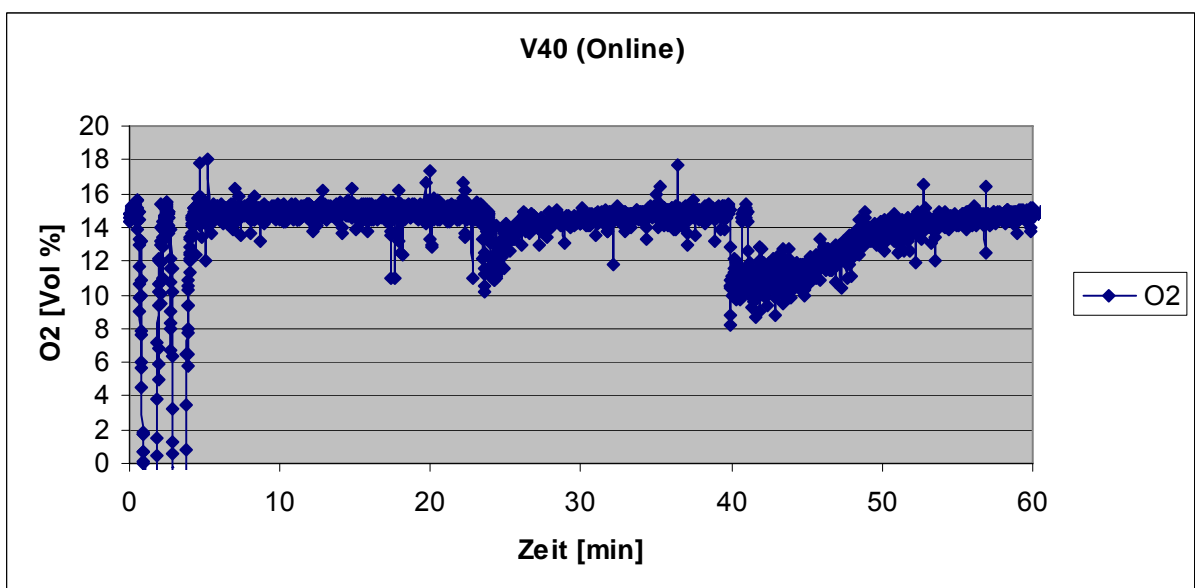
Umweltdaten	
Standort	Halle
Luftdruck [hPa]	1025
Luftfeuchtigkeit [%]	26
Temperatur [°C]	16

Bemerkungen
Gasgeschwindigkeit: 4,8 m/s
Nach 15 min keine eigenständige Flamme mehr und nach 26min keine konstante Flamme mehr und nach 45min keine Flamme mehr
Zündfrequenz des "HSZ": 1Hz
Gießtümpel halb voll gegossen

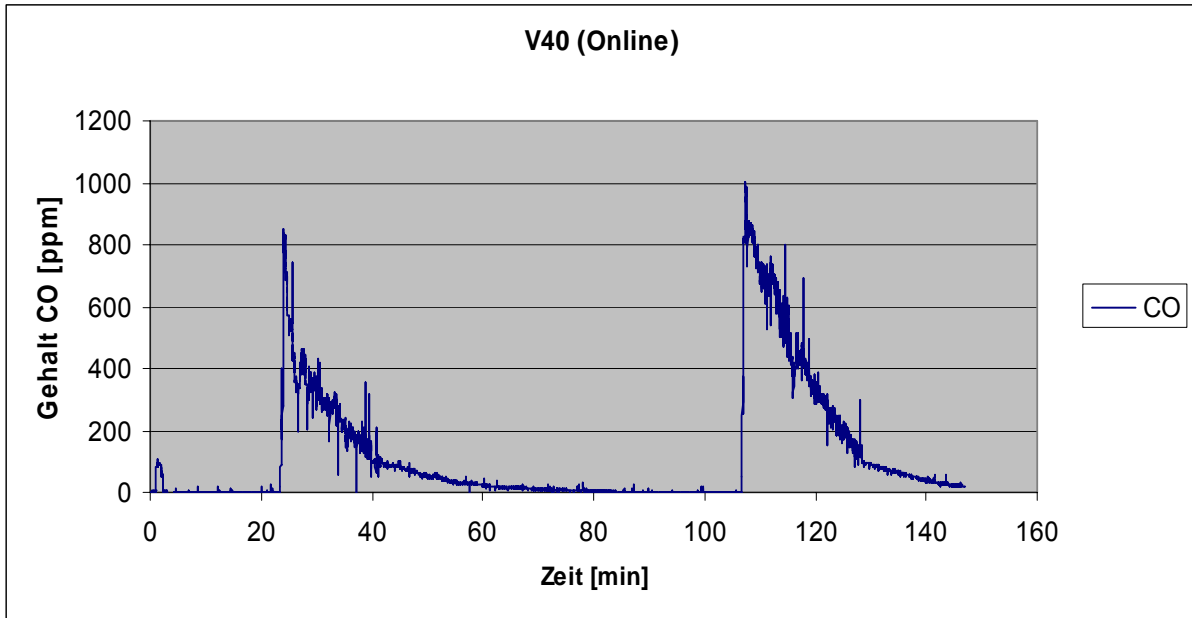




SO<sub>2</sub>-Diagramm



O<sub>2</sub>-Diagramm



CO-Diagramm

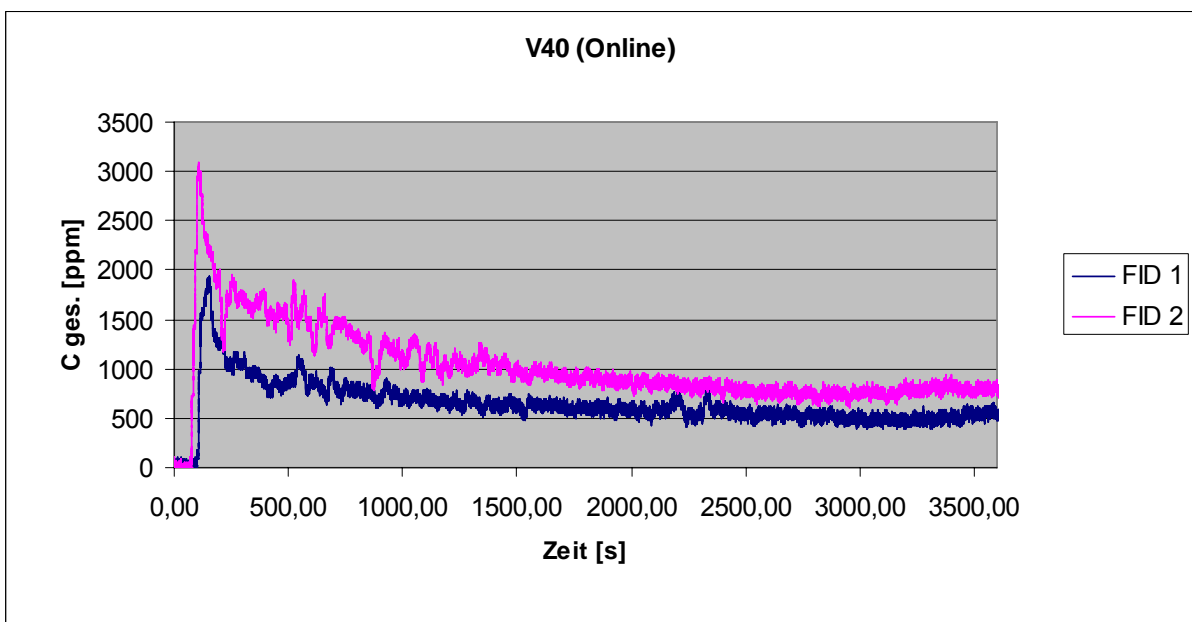


Diagramm über die Freisetzung von Propanäquivalente über die Zeit

**Anhang B – Exemplarisches Formstoffprotokoll**

IfG – Service GmbH

IfG gGmbH

Sohnstraße 70

D - 40237 Düsseldorf

Ihr Zeichen:	Ihre Bestell.:	Ihre Nachr. v.:	Uns. Zeichen	Durchw.:	Datum:
Herr Furth / Löttschert		23.09.2008	Mec	344	25.09.2008

**Prüfergebnis der Formstoffuntersuchung IfG-Nr.: S08-71573/P**Ihre Probenbezeichnung: **Formsand 22.09.08**

Unsere Auftrags-Nr.: S08-13978/A vom 23.09.2008

Probennahme u. Probenvorbereitung: durch Auftraggeber VDG-Merkblatt P 31

**Zusammensetzung (Trockensubstanz)**

Methylenblauadsorption MB	<b>24,9 mg/g</b>	VDG-Merkblatt P 35 Abschnitt 5
Bindefähiger Tongehalt errechnet aus MB	* %	VDG-Merkblatt P 35 Abschnitt 5
Gesamtglühverlust	<b>4,5 %</b>	VDG-Merkblatt P 33 Abschnitt 5.1
Kohlenstoff	<b>3,26 %</b>	IR-Analyse (CO <sub>2</sub> )
Kornanteil < 0,02 mm (Schlammstoff)	<b>10,1 %</b>	VDG-Merkblatt P 34 Abschnitt 4.2.3

**Kornanteil < 0,02 mm (Schlammstoff) Ergebnisse bezogen auf Gesamtformsand**

Glühverlust	<b>2,1 %</b>	VDG-Merkblatt P 36 Abschnitt 5.4
nichtbindefähiger Anteil	* %	VDG-Merkblatt P 36 Abschnitt 5.6

**Kornanteil > 0,02 mm Ergebnisse bezogen auf Gesamtformsand**

Glühverlust	<b>2,4 %</b>	VDG-Merkblatt P 36 Abschnitt 5.3
Kornanteil > 0,02 mm (Sandanteil)	<b>89,9 %</b>	VDG-Merkblatt P 34 Abschnitt 4.2

\* Der binde und nicht bindefähige Tongehalt, kann aufgrund der fehlender Methylenblauadsorption des eingesetzten Bentonites nicht errechnet werden.

IfG - Service GmbH



i. A. T. Meckel

GAZ-P-96-45-11-06-01

Seite: 1 von 3

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.  
Ohne schriftliche Genehmigung des IfG darf der Prüfbericht auszugsweise nicht veröffentlicht werden.

IfG – Service GmbH · Sohnstraße 70 · 40237 Düsseldorf · Postfach 10 30 44 · 40021 Düsseldorf

Geschäftsführerin: Dipl.-Ing. Angela Effinger

Sitz der Gesellschaft: 40237 Düsseldorf, Sohnstr. 70  
 Registergericht Düsseldorf HRB 42446  
 Telefon (0211) 6871-0 · Telefax (0211) 6871-317  
 E-Mail: info@ifg-net.de

Dresdner Bank AG, Düsseldorf 221 075 700 (BLZ 300 800 00)  
 Steuernummer: 105/5822/1501  
 Umsatzsteuer-Ident-Nr. DE813483456  
 www.ifg-net.de



IfG – Service GmbH

**Prüfergebnis der Formstoffuntersuchung IfG-Nr.: S08-71573/P**
Ihre Probenbezeichnung: **Formsand 22.09.08**

Unsere Auftrags-Nr.: S08-13978/A vom 23.09.2008

**Siebanalyse des geglähten Kornanteils größer 0,02 mm**

VDG-Merkblatt P 34 Abschnitt 4.3

Maschenweite	Siebinhalt	Körnungsmerkmale	
0,063 - 0,020 [mm]	0,8 [%]	th. spez. Oberfläche	97,8 cm <sup>2</sup> /g
0,090 - 0,063 [mm]	0,7 [%]	th. spez. Kornzahl	16,5 Stk/g
0,125 - 0,090 [mm]	2,1 [%]	repr. Durchmesser	0,14 mm
0,180 - 0,125 [mm]	12,5 [%]	Abweichungsgrad	41 %
0,250 - 0,180 [mm]	30,1 [%]	<b>Mittlere Korngröße</b>	<b>0,27 mm</b>
0,355 - 0,250 [mm]	38,7 [%]	Mittlere Korngröße calc.	0,27 mm
0,500 - 0,355 [mm]	13,4 [%]	AFS-Zahl	56
0,710 - 0,500 [mm]	1,6 [%]		
1,000 - 0,710 [mm]	0,1 [%]		
> 1,000 [mm]	0,1 [%]		

**Technologische Eigenschaften**

	im Anlieferungszustand	nach 5min kollern	
bei Wassergehalt	3,3 %	%	VDG-Merkblatt P 32
Schüttdichte	0,93 g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	VDG-Merkblatt P 37
Verdichtbarkeit	32 %	%	VDG-Merkblatt P 37
Rohdichte	1,46 g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	VDG-Merkbl. P 38 Absch. 4.5
Gasdurchlässigkeit	160		VDG-Merkblatt P 41
Naßzugfestigkeit	0,24 N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	VDG-Merkbl. P 38 Absch. 5.7
Gründruckfestigkeit	17,3 N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	VDG-Merkbl. P 38 Absch. 5.2
Scherfestigkeit	3,3 N/cm <sup>2</sup>	N/cm <sup>2</sup>	VDG-Merkbl. P 38 Absch. 5.3
Anteil > 3 mm	0,2 %		VDG-Merkblatt P 42
<b>Aufbereitungsgrad</b>	%		QMA-F. Form - 11

IfG - Service GmbH



GAZ-P-96-45-11-06-01

i. A. T. Meckel

Seite: 2 von 3

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.  
Ohne schriftliche Genehmigung des IfG darf der Prüfbericht auszugsweise nicht veröffentlicht werden.

IfG – Service GmbH · Sohnstraße 70 · 40237 Düsseldorf · Postfach 10 30 44 · 40021 Düsseldorf

Geschäftsführerin: Dipl.-Ing. Angela Effinger

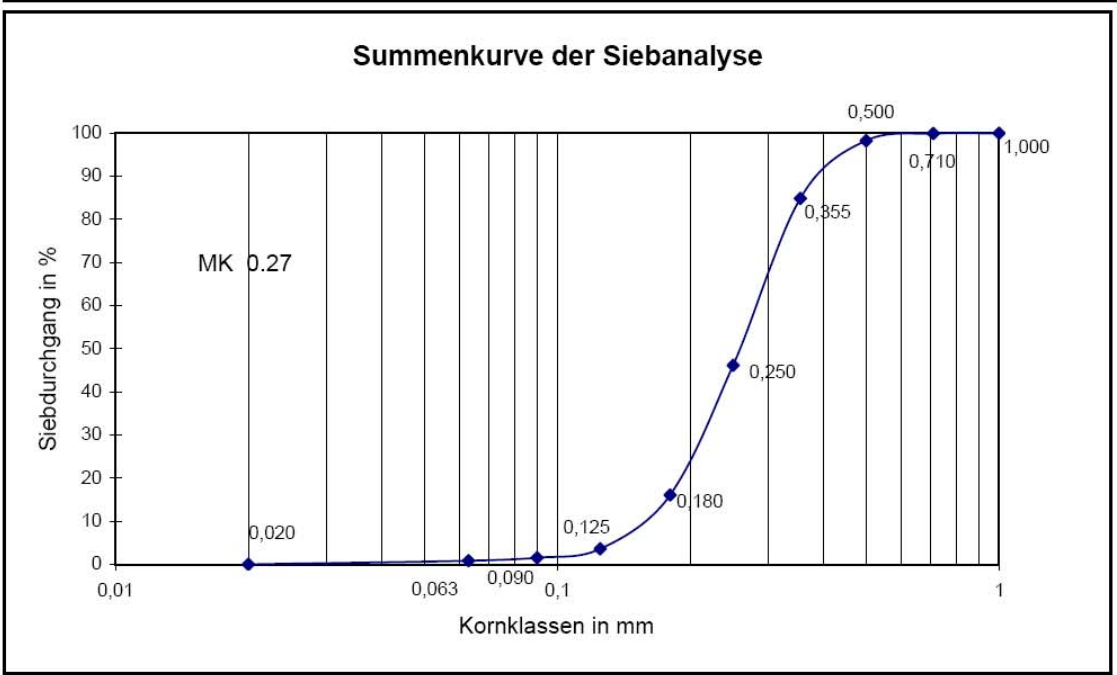
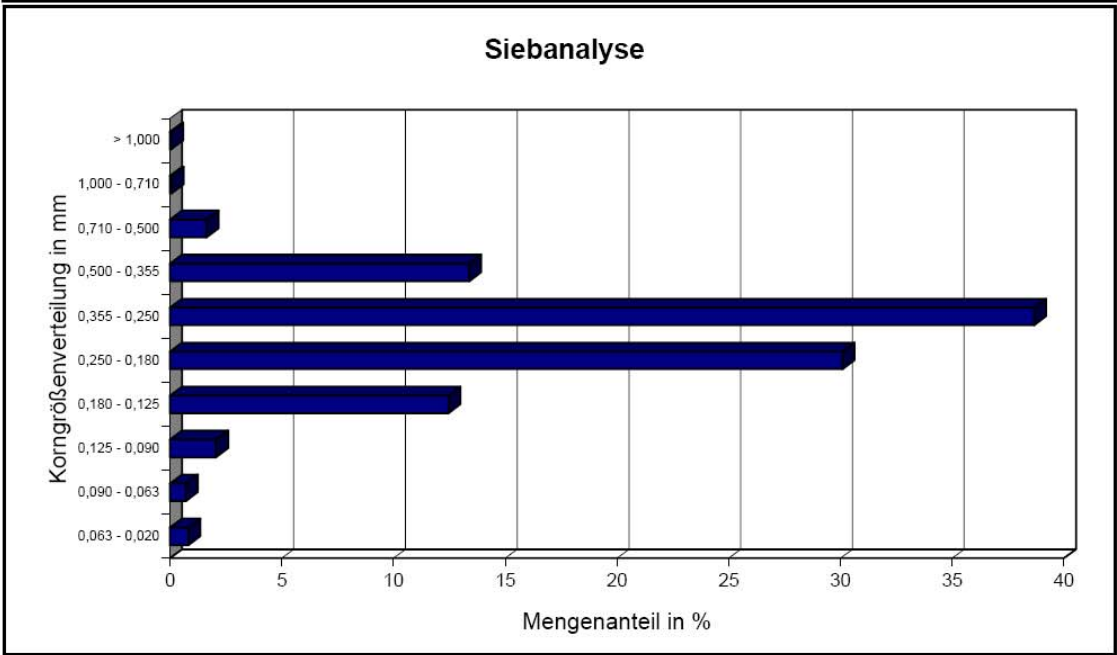
Sitz der Gesellschaft: 40237 Düsseldorf, Sohnstr. 70  
 Registergericht Düsseldorf HRB 42446  
 Telefon (0211) 6871-0 · Telefax (0211) 6871-317  
 E-Mail: info@ifg-net.de

Dresdner Bank AG, Düsseldorf 221 075 700 (BLZ 300 800)  
 Steuernummer: 105/5822/1501  
 Umsatzsteuer-Ident-Nr. DE813483456  
 www.ifg-net.de



IfG – Service GmbH

**Prüfergebnis der Formstoffuntersuchung IfG-Nr.: S08-71573/P**  
 Ihre Probenbezeichnung: **Formsand 22.09.08**  
 Unsere Auftrags-Nr.: S08-13978/A vom 23.09.2008



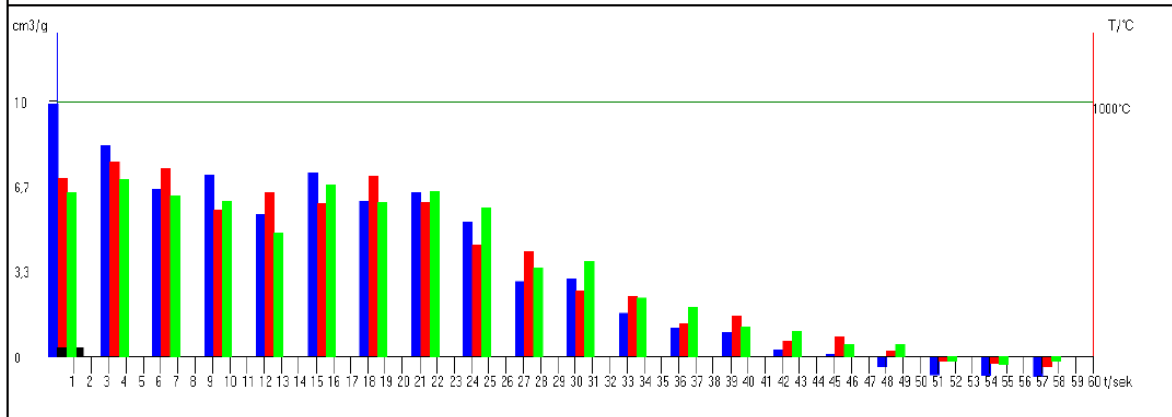
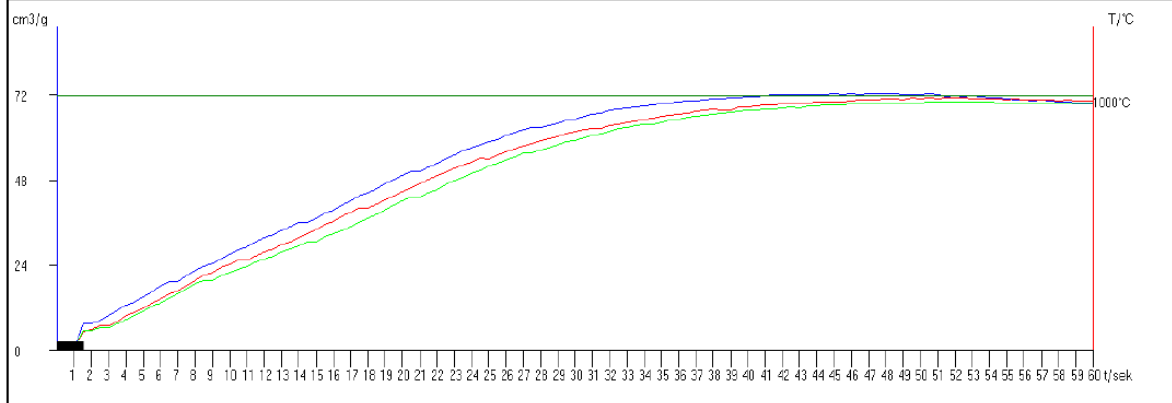
Seite: 3 von 3

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.  
 Ohne schriftliche Genehmigung des IfG darf der Prüfbericht auszugsweise nicht veröffentlicht werden.

IfG Auftrags-Nr. : S08-13978  
 IfG Probe-Nr. : 71573  
 Bezeichnung : Nr.8  
 Temperatur : 1000 °C  
 Ergebnis der Gasabgabe (cm<sup>3</sup>/g ges. und cm<sup>3</sup>/g 3sek)



Zeit [s]	1.Probe 5 g		2.Probe 5 g		3.Probe 5 g		Mittelwert	
3	9,9	9,9	7,0	7,0	6,4	6,4	7,8	7,8
6	18,1	8,3	14,6	7,6	13,4	6,9	15,4	7,6
9	24,7	6,5	22,0	7,4	19,7	6,3	22,1	6,7
12	31,8	7,1	27,7	5,7	25,8	6,1	28,4	6,3
15	37,3	5,6	34,1	6,4	30,6	4,9	34,0	5,6
18	44,5	7,2	40,1	6,0	37,3	6,7	40,7	6,6
21	50,6	6,1	47,2	7,0	43,4	6,1	47,1	6,4
24	57,0	6,4	53,2	6,1	49,9	6,4	53,4	6,3
27	62,3	5,3	57,6	4,4	55,7	5,8	58,5	5,1
30	65,2	2,9	61,7	4,1	59,1	3,5	62,0	3,5
33	68,3	3,0	64,2	2,6	62,9	3,7	65,1	3,1
36	70,0	1,7	66,6	2,4	65,2	2,3	67,2	2,1
39	71,1	1,1	67,9	1,3	67,1	1,9	68,7	1,5
42	72,0	0,9	69,5	1,6	68,3	1,2	69,9	1,2
45	72,3	0,2	70,1	0,6	69,2	1,0	70,5	0,6
48	72,4	0,1	70,9	0,8	69,7	0,5	71,0	0,4
51	72,0	-0,4	71,1	0,2	70,2	0,5	71,1	0,1
54	71,3	-0,7	70,9	-0,2	70,0	-0,2	70,8	-0,3
57	70,6	-0,8	70,6	-0,3	69,7	-0,3	70,3	-0,4
60	69,8	-0,8	70,3	-0,4	69,5	-0,2	69,9	-0,5



i.A. Tina Meckel

Die Prüfergebnisse beziehen sich nur auf die Prüfgegenstände.  
 Ohne schriftliche Genehmigung der IfG-Service GmbH darf der Prüfbericht auszugsweise nicht veröffentlicht werden.

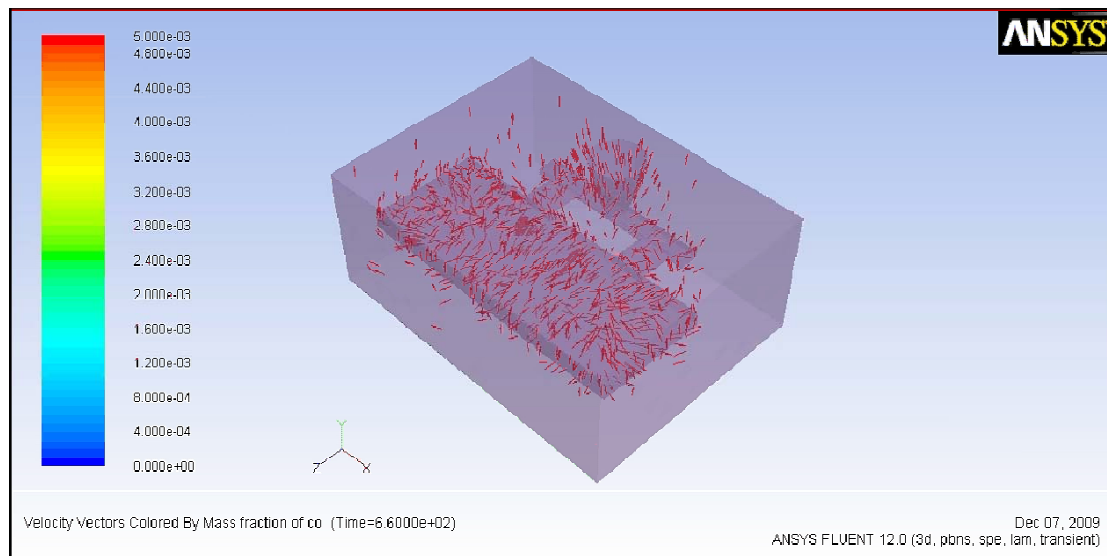
IfG-Service GmbH Sohnstraße 70 40237 Düsseldorf Postfach 103044 40021 Düsseldorf

Geschäftsführerin: Dipl.Ing. Angela Effinger

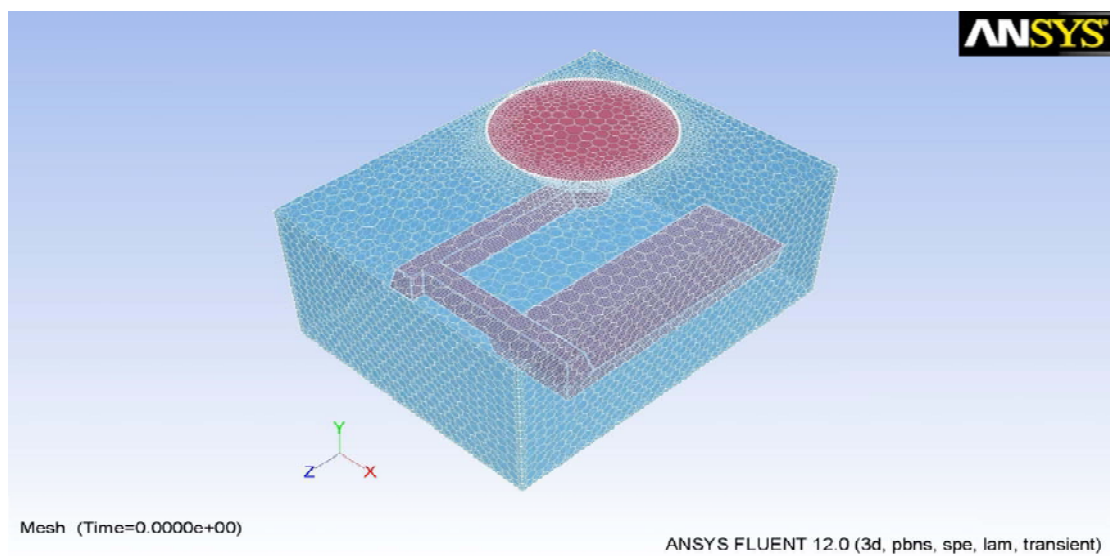
Sitz der Gesellschaft: 40237 Düsseldorf, Sohnstr. 70  
 Registergericht: Düsseldorf HRB 42446  
 Telefon (0211)6871-0 Telefax (0211)6871-317  
 E-Mail: info@ifg-net.de

Dresdner Bank AG, Düsseldorf 221 075 700 (BLZ 300 800 00)  
 Steuernummer: 105/5822/1501  
 Umsatzsteuer-Ident-Nr. DE813483456  
 www.ifg-service.de

## Anhang C - Simulation

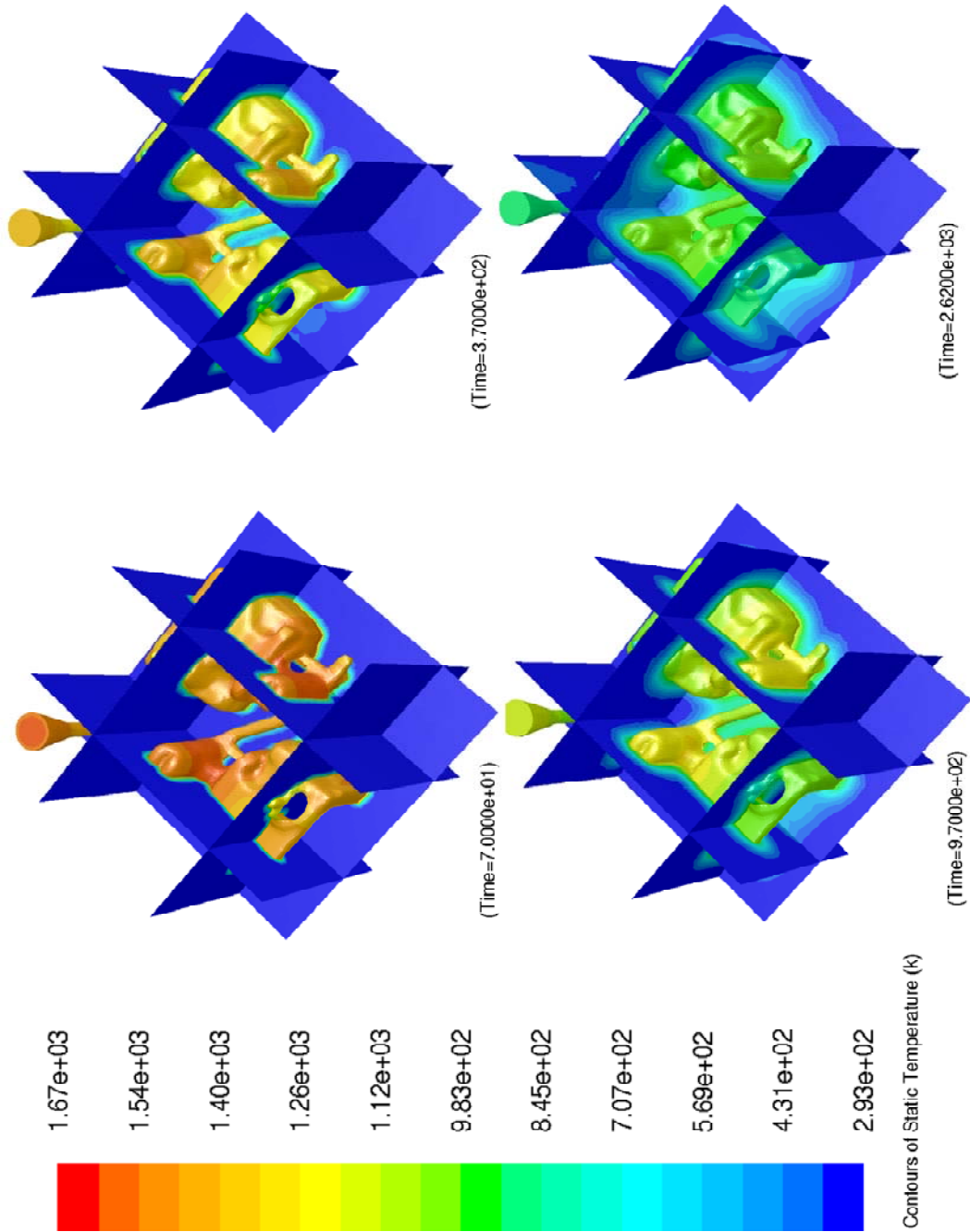


Strömungssimulation von CO nach dem Abguss einer Furanharzform



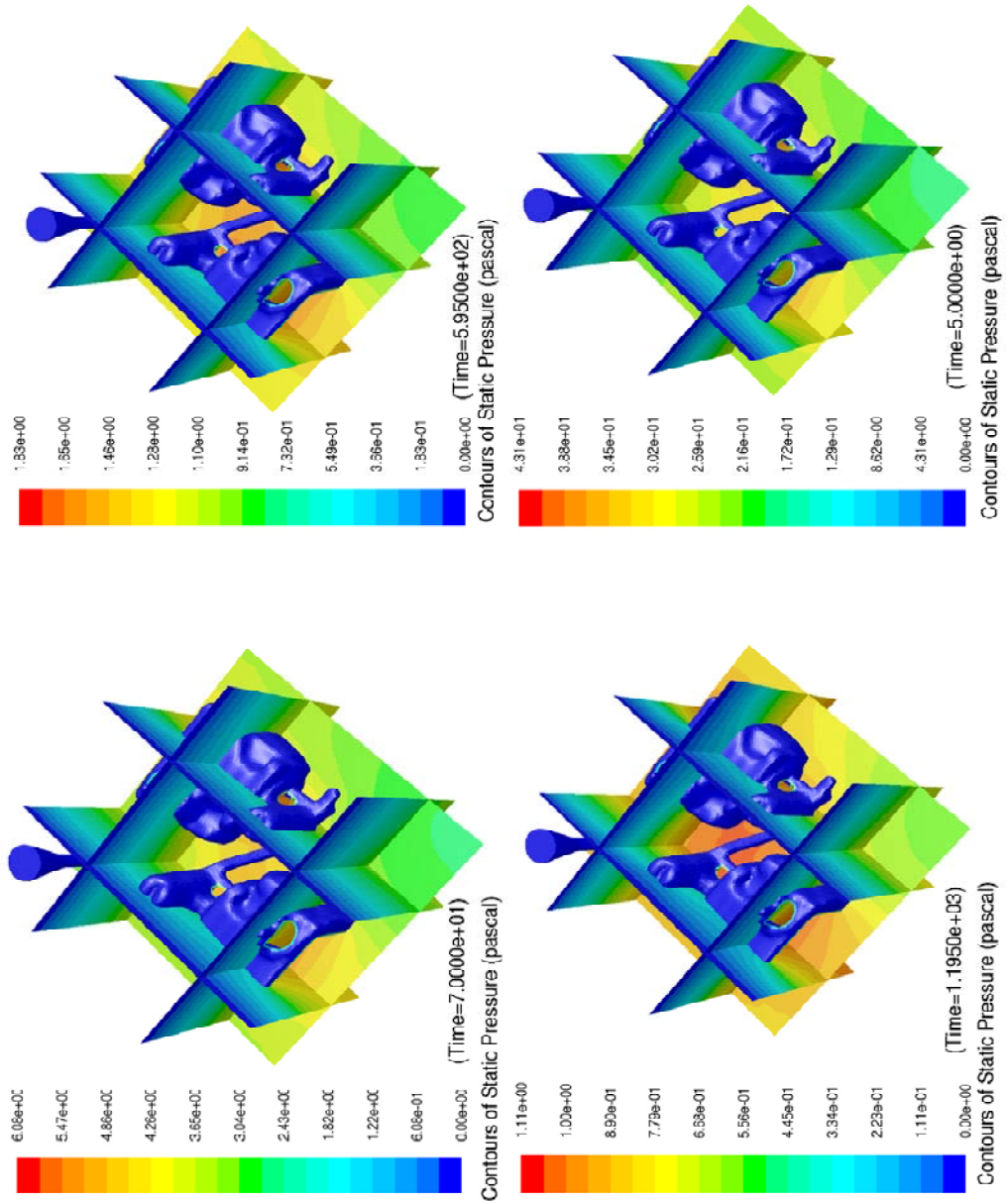
Rasterabbildung der im IfG-Technikum oft zum einsatzgebrachten Standardgeometrie

**Simulation der statischen Temperaturverteilung im Formstoff über die Zeit am Beispiel einer Grünsandform.**





Simulation eines statischen Druckverlaufs im Formstoff über die Zeit am Beispiel einer Grünsandform.



**Simulation der Gießgaskonvektion im Formstoff und dem Austritt an der Oberfläche über die Zeit am Beispiel der Kohlenmonoxidkonzentration in einer Grünsandform.**

