

Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT

Geschäftsfeld Energietechnik

Entwicklung und Optimierung von Einspartechnologien für industrielle Wärmeanwendungen durch Einsatz von sauerstoffangereicherter Luft

Abschlussbericht über das Projekt, gefördert
unter dem Az.: 22045 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Clemens Backhaus und Dipl.-Ing. Hubert Werneke

November 2005

Fraunhofer Institut Umwelt-, Sicherheits-, Energietechnik UMSICHT

Geschäftsfeld Energietechnik

Entwicklung und Optimierung von Einspartechnologien für
industrielle Wärmeanwendungen durch Einsatz von
sauerstoffangereicherter Luft

Abschlussbericht über das Projekt, gefördert
unter dem Az.: 22045 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Clemens Backhaus und Dipl.-Ing. Hubert Werneke

Kooperationspartner Fa. AIROX GmbH, Alpen
Fa. A&S Wärmetechnik GmbH, Moers

November 2005

Version 11. November 2005

 **Fraunhofer**
Institut
Umwelt-, Sicherheits-,
Energietechnik UMSICHT

DBU 
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	22045	Referat	24/0	Fördersumme	100.000,00 €
Antragstitel	Entwicklung und Optimierung von Einspartechnologien für industrielle Wärmeanwendungen durch Einsatz von sauerstoffangereicherter Luft				
Stichworte	Energie, Wärme, Industrie, Emission, Minderung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
12 Monate	13.08.04	13.08.05			
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Fraunhofer Institut Umwelt, Sicherheits- Energietechnik UMSICHT Osterfelder Straße 3 46047 Oberhausen			Tel	0208/8598-1415
				Fax	0208/8598-1423
				Projektleitung	Herr Werneke
				Bearbeiter	
Kooperationspartner	A & S Wärmetechnik GmbH, 47441 Moers AIROX GmbH, 45519 Alpen				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Wärmeprozesse im Industriesektor machen einen hohen Anteil am Energieverbrauch aus. Daher werden neue Entwicklungen hinsichtlich Energieeffizienz und Emissionsverminderung angestrebt. Im Rahmen einer Kooperation von Fraunhofer UMSICHT und den KMU, Firma A&S Wärmetechnik GmbH und AIROX GmbH, werden in einem innovativen Gemeinschaftsprojekt Grundlagenuntersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von Einspartechnologien für industrielle Wärmeanwendungen durch Einsatz sauerstoffangereicherter Luft durchgeführt. In speziellen Anwendungen der Stahlindustrie werden Warmhalteöfen und Pfannenfeuer eingesetzt. Ziel ist es Verbrennungsprozesse zu optimieren, Erdgas einzusparen sowie Emissionsminderungspotenziale aufgrund modifizierter Prozessparameter zu nutzen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Projekt unterteilt sich in 7 Arbeitspakete: der 1. Konzeptentwicklung, 2. Versuchsaufbau, 3. Messprogramm, 4. Auswertung, 5. Brennerkonzept, 6. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, 7. Dokumentation.

Fraunhofer UMSICHT entwickelte ein neues Verfahren zur Sauerstoffanreicherung von Luft mittels energiearmen Membrantrennverfahren. Mit einer Pilotanlage können die Inertgasanteile der Luft (N₂) reduziert werden und mit Sauerstoff angereicherte Verbrennungsluft zur Verfügung gestellt werden. Es sollen verbesserte Verbrennungsverläufe, Flammenstabilisierungen und Abgasrezirkulationen an vorhandenen Beheizungssystemen eingestellt werden.

Die Projektkoordination und wissenschaftliche Begleitung erfolgt durch UMSICHT. Anpassung, Modifikation der Brennersysteme und Anforderungskatalog bzw. Auslegungsgrundlagen an modular aufgebaute Membranmodulsysteme erfolgt in Zusammenarbeit der Projektpartner. Dazu wird ein Versuchsaufbau konzipiert. Mit Hilfe reproduzierbarer Versuchsergebnisse sind Optimierungspotenziale aufzuzeigen und durch konstruktive Verbesserungen umgesetzt werden. Folgende Auslegungskriterien sind im Rahmen des Projektes insbesondere zu untersuchen: verfahrenstechnische Aufwand und Anlagenkonzepte, Energieaufwand für die Erzeugung von Gasen in der gewünschten Qualität, Mess- und Regelkonzept der Brennertechnik, Kosten Wartungs- und Instandhaltungsaufwendungen, Spezifische Lebensdauer einzelner Komponenten.

Darüber hinaus erfolgt im Versuchsbetrieb eine Beurteilung des Verfahrens hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit.

Ergebnisse und Diskussion

In dem 8 Monate umfassenden Dauerbetrieb ist das Verfahren zur Sauerstoffanreicherung von Verbrennungsluft erfolgreich bei Feuerungen zur Beheizung von Gießpfannen in einem Stahlwerk integriert worden. Es wurden Erdgasbrenner mit einem Leistungsbereich von 2 MW entsprechend einem 200 m³/h Erdgasverbrauch zur Pfannenbeheizung von 80 t Gießpfannen betrieben. Durch die mit Sauerstoff angereicherte Verbrennungsluft sind verbesserte Verbrennungsverläufe, Flammenstabilisierungen und Abgasrezirkulationen an vorhandenen Beheizungssystemen eingestellt worden. Die Untersuchungen zu Strömungsumlenkungen (hochwarmfestes Metall, Keramik) führten zu konstruktiven Verbesserungen, die integriert werden konnten. Bei der Betriebsweise mit sauerstoffangereicherter Luft sind deutlich höhere Flammentemperaturen zu erzielen. Mit höheren Flammentemperaturen steigt auch der Anteil der durch Strahlung übertragenen Wärme. Dieser Effekt wird genutzt, um die Gießpfannen, speziell die Ausmauerung aus Feuerfestmaterial, mit einer optimal angepassten Flammgeometrie gleichmäßig auf geforderte Temperaturen aufzuwärmen. Die Verbrennungsprozesse wurden in Bezug auf Brennstoffeffizienz und Wärmeübertragungseigenschaften optimiert. Der Erdgasverbrauch wurde um bis zu 40 % sowohl in der Min- als auch in der Max-Betriebsweise vermindert. Zusätzlich sind kürzere Aufheizzeiten (bis 30 %) im Max-Betrieb realisierbar.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Patentsituation (Beantragung des Verfahrenspatentes beim Deutschen Patentamt in 06/2002 und ein PCT Patentverfahren) ist derzeit noch nicht abschließend geklärt. Daher wurden Veröffentlichungen und wissenschaftliche Berichte zurückhaltend verfasst. Bei Beginn des Projektes zeigten die ersten Erfahrungen zum Betriebs- und Regelverhalten der Pilotanlage sehr positive Versuchsergebnisse, so dass zielgerichtet eine Strategie zur aktiven Öffentlichkeitsarbeit entwickelt wurde. So wurde das Projekt, der Anlagenaufbau und die Versuchsdurchführung unterschiedlichen potenziellen Anwendern vorgestellt. Durch Präsentationen und Vorträge z.B. auf Fachausschusssitzungen für Leichtmetallguss (Nov. 04) konnten Kontakte zu Anwendern im Bereich der Aluminiumindustrie geknüpft werden. Weitere potenzielle Anwendungsbereiche bei Keramikerstellern, Ziegelherstellern und Unternehmen aus dem Bereich der Glasindustrie scheinen sehr interessant. Zusätzlich wurde ein Messeauftritt auf der Hannover Messe 2005 konzeptionell vorbereitet, koordiniert und erfolgreich durchgeführt. Im Rahmen der Fachaussstellung der HMI research & technology - gateway for innovations konnte auf dem Gemeinschaftsstand der Fraunhofer Venture Gruppe das DBU-geförderte Projekt vorgestellt werden. Im Rahmen einer organisierten Forumsveranstaltung wurde das Projekt dem interessierten Fachpublikum präsentiert. Des Weiteren wurde die Verfahrensentwicklung zur Sauerstoffanreicherung als Innovation für industrielle Wärmeanwendungen als Referenz des Geschäftsfeldes Energietechnik im Jahresbericht 2004 des Institutes UMSICHT vorgestellt und veröffentlicht.

Fazit

Am Standort TKN konnte der spezifische Energiebedarf der Pfannenfeuer deutlich gesenkt werden. Durch die Entwicklung und Optimierung von Einspartechnologien für industrielle Wärmeanwendungen unter Einsatz von sauerstoffangereicherter Luft konnten resultierend Wirkungsgradverbesserungen für konventionelle Anlagenkonzeptionen erzielt werden. Ein wichtiger Bestandteil des Projektes sind die Erfahrungen zum Dauerbetrieb der Pilotanreicherungsanlage. Der Sauerstoffgehalt und die Volumenströme können gut regelbar eingestellt werden. Es wurden keine größeren Ausfälle verzeichnet. Das Verfahren ist unter energetischen Gesichtspunkten optimiert worden und es wird ein Energiebedarf von ca. 0,065 kWh/Nm³ O₂-angereicherter Luft (Permeat) mit einem O₂-Gehalt von 28 % benötigt (Auslegungspunkt der Pilotanlage 550 Nm³/h). Diese sehr positiven Erfahrungen zeigen, dass die Technik der Sauerstoffanreicherung basierend auf innovativer Membrantrenntechnik alltagstauglich einzusetzen ist. Das Trennverhalten der verwendeten Membran und die erreichbare Qualität der angereicherten Luft bleiben über die Zeit konstant.

Die Vorteile der Einspartechnologie durch den Einsatz von Sauerstoff angereicherter Luft für industrielle Wärmeanwendungen sind: Reduzierung des Erdgasverbrauches um bis zu 40 %, Energieeinsparpotenzial, kürzere Aufheizzeiten, Verminderung von Treibhausgasemissionen (reduzierte CO₂-Menge), Optimierung der Verfahrenstechnik und Prozessoptimierung, Reduzierung von Schadstoffemissionen (Einhaltung der TA Luft Grenzwerte), regelbare Flammentemperaturen, verbesserte Wirtschaftlichkeit des Betriebes.

Der optimale Einsatz von Ressourcen, die Steigerung der Brennstoffeffizienz und geringere Emissionen sind ein entscheidender Beitrag zur Schonung der Umwelt.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt £ An der Bornau 2 £ 49090 Osnabrück £ Tel 0541/9633-0 £ Fax 0541/9633-190 £ <http://www.dbu.de>

2 Inhaltsverzeichnis

1	Projektkennblatt	3
2	Inhaltsverzeichnis	5
3	Verzeichnis von Abbildungen, Tabellen, Grafiken und Zeichnungen	6
4	Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	7
5	Einleitung	9
6	Hauptteil	13
6.1	Konzeptentwicklung - Projektziel	13
6.1.1	Projektvorarbeiten	13
6.1.2	Vorversuch	15
6.2	Brenneranalyse	16
6.3	Versuchsaufbau Brennerkonzept, Optimierung	18
6.3.1	Brennerstein – Strömungsumlenkung	19
6.4	Messprogramm TKN	21
6.4.1	Versuchsaufbau	23
6.4.2	Versuchsdurchführung	25
6.4.3	Auswertung der Versuche	26
6.5	Brennerkonzept-Auslegungsgrundlagen	34
6.5.1	Einfluss der Strömungsumlenkung	35
6.5.2	Mechanismen Wärmeübertragung – Wärmeübertragung durch Strahlung	36
6.5.3	Betriebsoptimierung – weitere Einsparpotenziale	38
6.6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	41
6.7	Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation	45
7	Fazit	46
8	Literaturverzeichnis	49
8.1	Literatur	49
9	Anhang	52
9.1	Abbildungen Stahlwerk TKN, Pfannenfeuer	52
9.2	Ergebnisse Dauerbetrieb	56
9.3	Brenner, Strömungsumlenkung, Option Optimierung	58

3 Verzeichnis von Abbildungen, Tabellen, Grafiken und Zeichnungen

Abbildung 1	Anlage zur O ₂ Anreicherung	10
Abbildung 2	Pfannenfeuer im Stahlwerk	11
Abbildung 3	Detail Hohlfasermembran	14
Abbildung 4	Membrantrennverfahren	15
Abbildung 5	Flammenbild Pfannenfeuer 2 – 4	18
Abbildung 6	Keramik Materialien, Anwendungsgebiete, Temperaturen	21
Abbildung 7	Leistung Gesamt Verdichter	22
Abbildung 8	Betriebsphase der Pilotanlage	23
Abbildung 9	Thermische Beanspruchung einer Stahlpfanne	24
Abbildung 10	Optimiertes Pf.-F. 1, Details Flamme	27
Abbildung 11	Gasverbrauchswerten u. IST Temperatur Pf.-F. 1, 24.11.04	28
Abbildung 12	Vergleich Aufheizkurven Pf.-F. 1, opt. u. Pf.-F. 2, 24.11.04	30
Abbildung 13	CO ₂ -Äquivalent durch Einsparung an Erdgas	33
Abbildung 14	Umlenkung Pf.-F 2, Metallring	36
Abbildung 15	Mechanismus Wärmestrahlung	37
Abbildung 16	Adiabate Verbrennungs-Temperatur, Einfluss Vorwärmung	39
Abbildung 17	Wirtschaftlichkeit O ₂ Membrankonzept	42
Abbildung 18	Wirtschaftlichkeit O ₂ Netz TKN	44
Abbildung 19	Pfannenfeuer 1	52
Abbildung 20	Pf.-Feuer 1 u. 2 nach Optimierung, P = 1,2 MW/Feuer	53
Abbildung 21	Ansicht Produktionshalle TKN	53
Abbildung 22	Pf.-Feuer 2 vor Optimierung, Flammengkegel Mischungszone	54
Abbildung 23	Pf.-Feuer 1, Brenneröffnung	54
Abbildung 24	Ansicht Gießpfanne, 80 t	55
Abbildung 25	Pf.-F. 1, optimierte parallele Flammenform	55
Tabelle 1	Technische Daten für ein Pfannenfeuer 2 MW	17
Tabelle 2	Umweltrelevante Daten für ein Pfannenfeuer	31
Tabelle 3	Leistungsbereich u. Technische Daten Pf.-F. 1 nach Optimierung	32

Grafik 1 Dauerbetrieb Pilotanlage 04	56
Grafik 2 Dauerbetrieb Pilotanlage 05	56
Grafik 3 Tagesdokumentation 04.11.04 Pilotanlage, 15 Sek. Werte	57
Zeichnung 1 Versuchsaufbau Pfannenfeuer	59
Zeichnung 2 Strömungsumlenkung, Metall	60
Zeichnung 3 Strömungsumlenkung Keramik	61
Zeichnung 4 Wärmetauscher Brennerschild, Option Optimierung	62
Zeichnung 5 Wärmetauscher Variante B, Brennerschild, Option Optimierung	63
Zeichnung 6 Messrohr Abgas	64

4 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Abgasmenge feucht	$V_{\text{Abg}_{0,f.}}$	$\text{m}^3\text{Abgas}/\text{m}^3\text{Gas}$
Abgasmenge trocken	$V_{\text{Abg}_{0,tr.}}$	$\text{m}^3\text{Abgas}/\text{m}^3\text{Gas}$
Brennwert	H_o	$\text{kWh}/\text{m}^3, \text{kJ}/\text{kg}$
Dichte	ρ	kg/m^3
Druck	p	bar, mbar
Heizwert	H_u	$\text{kWh}/\text{m}^3, \text{kJ}/\text{kg}$
Höhere Kohlenwasserstoffe	C_nH_m	

Kohlendioxid	CO ₂	
Laminare Brenngeschwindigkeit	c _{lam}	m/s
Leistung	P	kW
Luftfaktor	L	m ³ Luft/ m ³ Brenngas
Luftverhältnis	$\lambda = L / L_{\min}$	
Methan	CH ₄	
Mindestluftfaktor	L _{min}	m ³ Luft / m ³ Brenngas
Sauerstoff	O ₂	Gehalt in %
Stickstoff	N ₂	
Temperatur	T	K
Volumen	V	m ³
Wasserstoff	H ₂	
Wirkungsgrad	η	

5 Einleitung

Aufgrund der Umweltschutzaufgaben und der Zielvorgaben zur Emissionsminderung werden speziell im industriellen Bereich Anlagen und Brenner sowie die Verbrennungsprozesse ständig optimiert. Besonders in den letzten Jahren ist die Weiterentwicklung von Industriebrennern deutlich vorangeschritten. Neue Werkstoffe, effiziente Energieausnutzung und Schadstoffminimierung sind nur einige Beispiele. Wärmeprozesse im Industriesektor machen einen hohen Anteil am Energieverbrauch aus. Mit einem Anteil von ca. 40 % des in der Industrie erforderlichen Endenergieverbrauches besteht hier ein großes Einsparpotenzial.

Daher werden neue Entwicklungen hinsichtlich Energieeffizienz und Emissionsverminderung angestrebt. Im Rahmen einer Kooperation von Fraunhofer Institut Umsicht und den KMU, Firma A&S Wärmetechnik GmbH und AIROX GmbH, wurden in einem Gemeinschaftsprojekt Grundlagenuntersuchungen zur Entwicklung und Optimierung von innovativen Einspartechnologien für industrielle Wärmeanwendungen durch Einsatz sauerstoffangereicherter Luft durchgeführt.

Das vom Fraunhofer Institut UMSICHT entwickelte Verfahren zur Sauerstoffanreicherung von Luft basiert auf dem Einsatz innovativer modular aufgebauter Membrantechnik. Für viele thermische Anwendungen insbesondere für Verbrennungsprozesse ist es ausreichend, mit Sauerstoff angereicherte Volumenströme und nicht Sauerstoff als Reingas als Verbrennungsluft zu verwenden. Hier ist es sinnvoll Gastrennverfahren mit Membrantrenneinheiten einzusetzen. In einem Membranmodul sind bis zu 10.000 Hohlfasern zusammengefasst.

Vorteil einer solchen Gastrennung ist die energiearme Erzeugung von Gasen in der gewünschten Qualität. Die Gastrennung mit Membranen zeichnet sich besonders durch geringen verfahrenstechnischen Aufwand aus und durch kompakte, einfach zu integrierbare Anlagentechnik.

Im Jahr 2003 wurde im DBU Projekt - Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Nutzung niederkalorischer Gase (Schwachgase) in Gasmotoren - (AZ 20308, Projektzeitraum 11/2002 bis 05/2003) die Anpassung des neuen verfahrenstechnischen Lösungskonzeptes der Sauerstoffanreicherung am Beispiel der gasmotorischen Nutzung in Blockheizkraftwerken BHKW detailliert untersucht. Dabei wurden grundsätzliche Daten zum Trennverhalten der Membrananlage untersucht. In Versuchsreihen wurde überprüft, welche Randbedingungen und

Parameter für einen optimalen Betrieb des neuen Verfahrens einzuhalten sind. Mit Hilfe der reproduzierbaren Versuchsergebnisse sind Optimierungspotenziale aufgezeigt worden. Es konnten mit Sauerstoff angereicherte Volumenströme in der Qualität bis ca. 30 % für Verbrennungsprozesse bereitgestellt werden. In dem Projekt sind die Auslegungsgrundlagen für die Projektierung einer Pilotanlage entwickelt worden.

Durch die positiven Ergebnisse dieses Projektes bestärkt, erstellte das Fraunhofer Institut UMSICHT aus Eigenmitteln eine Pilotanlage ausgerüstet mit 70 marktverfügbaren Membranmodulen.

Abbildung 1

Anlage zur O₂
Anreicherung



Mit der Pilotanlage können Volumenströme bis ca. 550 Nm³/h bei einem Druckniveau von 1,03 bar_{absolut} erzielt werden. Abbildung 1 zeigt die Pilotanlage, die komplett inklusive der erforderlichen Mess- und Regeltechnik in einem 20 ft Stahlsondercontainer mit den Abmaßen von 6,058 m x 2,435 m x 2,591 m eingebaut wurde und ein Gesamtgewicht < 7,5 t aufweist.

Langzeiterfahrungen zum Betriebsverhalten der Sauerstoffanreicherungsanlage und Prozesssteuerung des Trennprozesses sind von besonderem Interesse und daher Bestandteil der Untersuchungen des durchgeführten Projektes zur Entwicklung und Optimierung von Einspartechnologien für industrielle Wärmeanwendungen durch Einsatz von sauerstoffangereicherter Luft.

In speziellen Anwendungen der Stahlindustrie werden Warmhalteöfen und Pfannenfeuer eingesetzt. Die Firma ThyssenKrupp Nirosta GmbH (TKN) er-

möglichst es den Projektpartnern die Untersuchungen im Stahlwerk Bochum durchzuführen (s.a. Abbildungen im Kapitel 9 Anhang). Abbildung 2 zeigt ein Pfannenfeuer, das zur Beheizung einer Gießpfanne für ein Fassungsvermögen von 80 t Stahl (flüssig) genutzt wird. Die Gießpfannen werden zum Transport innerhalb des Produktionsprozesses im Stahlwerk eingesetzt. Es handelt sich um ein Pfannenfeuer mit einem Erdgasbrenner mit einer Leistung von 2 MW, der zur Vorwärmung der Ausmauerung in waagerechter Lage dient.

Abbildung 2

Pfannenfeuer im
Stahlwerk



Ziel dieses Vorhabens ist es, Verbrennungsprozesse in Bezug auf Brennstoffeffizienz und Wärmeübertragungseigenschaften zu optimieren, Erdgas einzusparen sowie Emissionsminderungspotenziale aufgrund modifizierter Prozessparameter zu nutzen. Dabei sind die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte der TA Luft für Schadstoffemissionen einzuhalten.

Erwartete Vorteile der Einspartechnologie durch den Einsatz von sauerstoffangereicherter Luft für industrielle Wärmeanwendungen sind:

- Reduzierung des Erdgasverbrauches, mögliches Energieeinsparpotenzial bis zu 30 %
- Verminderung von Treibhausgasemissionen (reduzierte CO₂-Menge)

- Optimierung der Verfahrenstechnik, Prozessoptimierung, Reaktionstechnik
- Reduzierung von Schadstoffemissionen
- Regelbare Flammentemperaturen
- Kapazitätserweiterung vorhandener Anlagentechnik
- Verbesserte Wirtschaftlichkeit des Betriebes

Es werden grundlegende experimentelle Untersuchungen zu Mischungs- und Verbrennungsvorgängen durchgeführt. Die Ergebnisse werden im folgenden Bericht detailliert dargestellt.

Durch die Entwicklung und Optimierung von Einspartechnologien für industrielle Wärmeanwendungen unter Einsatz von sauerstoffangereicherter Luft sollen resultierend Wirkungsgradverbesserungen für konventionelle Anlagenkonzeptionen erzielt werden. Optimaler Einsatz von Ressourcen, Steigerung der Brennstoffeffizienz und geringere Emissionen sind ein entscheidender Beitrag zur Schonung der Umwelt.

6 Hauptteil

6.1 Konzeptentwicklung - Projektziel

Im Stahlwerk TKN in Bochum werden 4 parallele baugleiche Pfannenfeuer mit Erdgasbrennern für die Produktion vorgehalten. Im Rahmen des Projektes wurden die Betriebsauswirkungen für eine praktische Anwendung untersucht und optimiert. Der Produktionsbetrieb erfolgt im Drei-Schichtbetrieb, wobei jeweils 8 Pfannen im Kreislaufbetrieb vorgehalten werden. Ein störungsfreier und kontinuierlicher Betrieb hat eine sehr hohe Bedeutung für die Qualität der produzierten Stahlsorten und daher wurde auf eine reibungslose Versuchsdurchführung besonders Wert gelegt.

Es wurden Grundlagen für Aufheizvorgänge, für energetisch optimalen Wärmestrahlungsaustausch, für Dauer und für den optimalen Leistungsbereich der Brenner dokumentiert. Die Detailuntersuchungen zu den sich einstellenden Verbrennungseigenschaften mit sauerstoffangereicherter Luft ermöglichen eine Bilanzierung der Pfannenfeuer unter wirtschaftlichen und umweltrelevanten Gesichtspunkten.

Mit Hilfe der Untersuchungsergebnisse sollen weitere Einsparpotenziale identifiziert werden. Durch konstruktive Änderungen und Anpassungen an den Brennern, Mischzonen, Gasregelstrecken und Flammenschild sind weitere Einsparungen des Gasverbrauches zu realisieren.

Im Rahmen des Projektes Entwicklung und Optimierung von Einspar-technologien für industrielle Wärmeanwendungen durch Einsatz sauerstoffangereicherter Luft sollen die Grundlagen für eine breite Anwendung der neuen Technologie zur Verfügung gestellt werden.

6.1.1 Projektvorarbeiten

Das Fraunhofer Institut UMSICHT entwickelte ein neues Verfahren zur Sauerstoffanreicherung von Luft. Basierend auf dem Einsatz innovativer modular aufgebauter Membrantechnik wurde ein neues verfahrenstechnisches Lösungskonzept entwickelt. Bereits im Juni 2002 ist ein Verfahrenspatent beim Deutschen Patentamt eingereicht worden. Im weiteren Verlauf ist ein PCT Verfahren zur Sicherung der Patenansprüche initiiert worden. Eine abschließende Stellungnahme liegt bisher nicht vor.

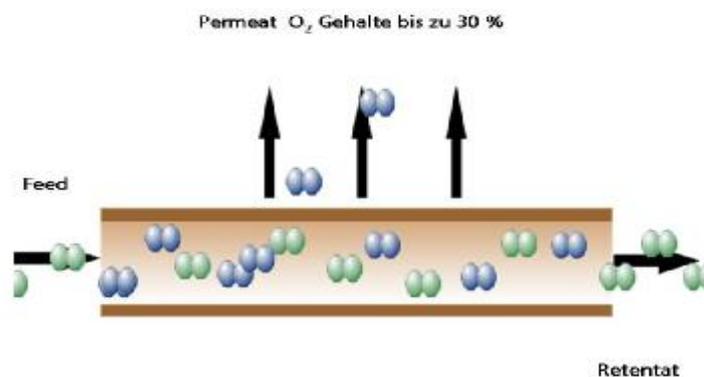
In Abbildung 4 ist das Verfahren dargestellt. Luft wird aus der Umgebung über Filterelemente (1) angesaugt, verdichtet und gegebenenfalls erwärmt oder gekühlt einer Membrantrenneinrichtung (5) zugeführt. Das Verfahren zur Anreicherung der Luft mit Sauerstoff basiert auf dem Trennmechanismus der Gaspermeation, bei dem sowohl der einer Membrantrenneinrichtung zugeführte Feedvolumenstrom (4) und die abgehenden Volumenströme, der Retentatstrom (5) (mit Sauerstoff abgereicherte Volumenstrom) als auch der Permeatstrom (7) mit Sauerstoff angereicherter Luft mit bis zu 28 % O_2 Gehalten gasförmig vorliegen.

In einem Membranmodul sind beispielsweise bis zu 10.000 einzelne Hohlfasern zusammengefasst. Der Lösungs-Diffusions-Mechanismus in einer einzelnen Hohlfasermembran ist in Abbildung 3 veranschaulicht. Beide Bestandteile der Luft, die Moleküle Sauerstoff O_2 und Stickstoff N_2 , werden in der dichten Membrantantelfläche jedes einzelnen Hohlfaserfadens zunächst auf der Innenseite gelöst, durch die Polymerstruktur geleitet (Diffusion) und auf der Außenseite wieder gelöst. Die Membran besteht aus einer so genannten Stützschiicht und der den Gastrennungsprozess bestimmenden Trennschicht auf der Außenseite der Hohlfaser.

Einflussfaktoren sind die Materialeigenschaften der Membran, Permeabilität und Selektivität, die Druckniveaus der zuführenden und abgehenden Volumenströme, die Temperaturen und die Art und Weise der Modulgestaltung (Abmaße, Membranaustauschfläche, Füllungsgrad). Der Trenneffekt basiert darauf, dass der Sauerstoff schneller als der Stickstoff durch die Membran hindurch geht.

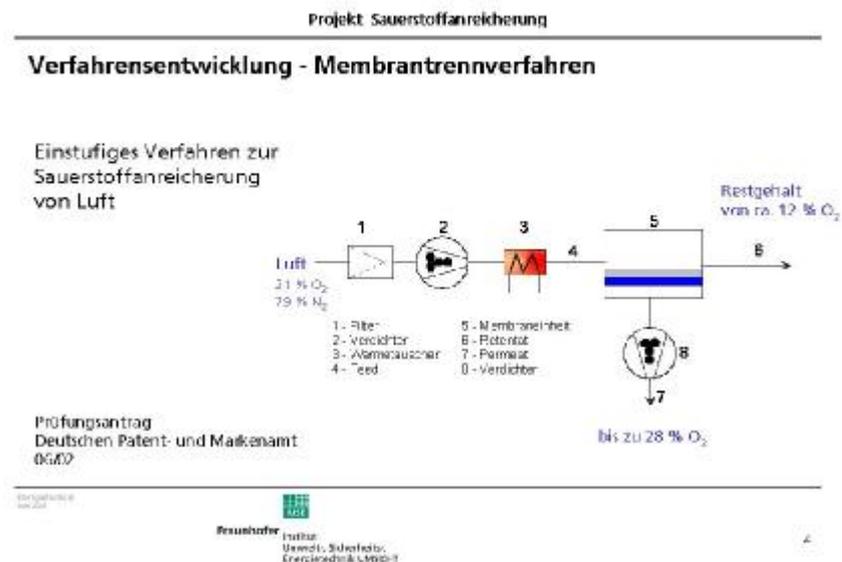
Abbildung 3

Detail
Hohlfasermembran



Mit dem innovativen Lösungsansatz, den sauerstoffangereicherten Permeatvolumenstrom gezielt abzusaugen und das Druckniveau abzusenken (Absauggebläse (8)), ergibt sich eine Verbesserung des Trennprozesses. Dadurch wird es möglich, den Feedvolumenstrom (4) zu optimieren. Auf Grund des geringeren Feedvolumenstromes, der noch zu verdichten ist, ist energetisch ein deutlich günstigeres Verfahren entwickelt worden. Im Retentatvolumenstrom sind dann beispielsweise Restgehalte von 12 % O₂ enthalten.

Abbildung 4
Membrantrennverfahren



6.1.2 Vorversuch

Im Rahmen eines Vorversuchs wurde die Testanlage zur Bereitstellung sauerstoffangereicherter Luft auf dem Stahlwerk installiert und provisorisch mit der vorhandenen Pfannenbeheizung verbunden. Der provisorische Brennerbetrieb konnte die Betriebstauglichkeit der Anlage zur Sauerstoffanreicherung von Luft dem Betriebspersonal demonstrieren. Es wurden Erdgaseinsparungen in der Größenordnung von ca. 60 m³/h erzielt. Bei dem Vorversuch wurde eine konstante Luftmenge durch die Anlage bereitgestellt.

6.2 Brenneranalyse

Der Erdgasbrenner in den Pfannenfeuern ist für einen Leistungsbereich von 2 MW entsprechend einem Gasverbrauch von 200 Nm³/h Erdgas eingestellt. Der Leistungsbereich schwankt je nach Einstellung im Max- und Min-Betriebszustand jeweils um bis zu 10 % nach oben oder nach unten.

Es handelt sich um Ley-Brenner, Baujahr 1982. Die Brenner zeichnen sich durch wenig bewegliche Teile aus und sind sehr robust in der Handhabung. Es kann eine Min-Betriebsweise für den Warmhaltebetrieb und ein Max-Betriebsweise für die Aufheizphase eingestellt werden. Im Automatikbetrieb ist als Führungsgröße eine Temperaturmessstelle unterhalb des Brennermundes im Brennerschild integriert. Es ist eine Sollwert Vorgabe von 700 °C in der Brennerregelung eingestellt. Die Zündflamme ist auf einen Dauerbetrieb eingestellt, damit aufgrund der hohen Staubbelastung keine Ablagerungen im Brennerkopf und Brennermischungsrohr entstehen.

Die Einstellung des Erdgas-Luft-Gemisches bzw. die Gemischregelung erfolgt mit einem Gleichdruckregler. Der Luftdruck nach dem Luftstellglied wird als Führungsgröße dem in der Gasleitung vor dem Brenner angeordneten Gleichdruckventil aufgeschaltet. Die Gemischregelung ist so konzipiert, dass bei etwa gleichen Gas und Luftdruck am Brenner die vorgegebene Luftzahl über einen Stellbereich konstant gehalten wird. Die Einstellung der Basisluftzahl erfolgt mit einer Reguliereinrichtung manuell vor dem Brenner. Die Luft wird über ein Gebläse (Filter) aus der Produktionshalle angesaugt und dem Brenner zugeführt.

Die Abgase werden über den Spalt in die Hallenumgebung (s.a. Abbildung 21 Ansicht Produktionshalle) abgeführt. Entsprechend der Führungsgröße der Temperatur von 700 °C erfolgt eine Mengenregelung Min- und Max-Betrieb über eine automatische Klappenregelung. Bei Max-Betrieb ist ein aufgrund der Volumenströme (Menge) des Brenngas-Luft-Gemisches ein Überdruck innerhalb der Gießpfanne; beim Min-Betrieb sind die Volumenströme geringer (Faktor ½, Unterdruck), so dass Luft aus der Umgebung angesaugt wird. Die Wärmeverluste sind in diesem Betriebszustand durch die zusätzliche angesaugte Luftmenge höher. Die Gasverbrauchsdaten und Ist-Temperatur im Brennerschild werden über die Brennersteuerung jedes Pfannenfeuers zentral an die Betriebsleitstelle weitergeführt und dokumentiert.

Tabelle 1 dokumentiert die technischen Daten, den Erdgasbedarf und die erforderlichen Luftmengen für einen Brenner vor der Optimierung. Des Weiteren sind die sich einstellenden Abgasmengen trocken und feucht aufgeführt.

Tabelle 1

Technische Daten für ein
Pfannenfeuer 2 MW

Pfannenfeuer 2 MW		
Erdgasbedarf, Heizwert 10,3 kWh/m ³ Gas gewählt 10 kWh/m ³ Gas	200	m ³ /h
Luftverhältnis λ	1,1	
Mindestluftfaktor bei O ₂ von 21 %	9,81	
Luftmenge mit 21 % Sauerstoff	2158,2	m ³ /h
Abgasmenge feucht V Abg. _{0,f.}	11,72	m ³ Abgas/m ³ Gas
Abgasmenge feucht, abs.	2344	m ³ Abgas feucht
Abgasmenge trocken V Abg. _{0,tr.}	9,83	m ³ Abgas/m ³ Gas
Abgasmenge trocken, abs.	1966	m ³ Abgas trocken
Min-Betrieb	100	m ³ /h Erdgas
Max-Betrieb	200	m ³ /h Erdgas

In Abbildung 5 sind das Flammenbild und die Ausmauerung der Gießpfanne für das Pfannenfeuer 2 vor der Optimierung dokumentiert. In dem hier gezeigten Betriebszustand für den Max-Betrieb ist die Ausmauerung erkennbar (linkes Foto). Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Flammentemperaturen geringer als beim optimierten Feuer sind (s.a. Abbildung 10 optimiertes Pf.-F. 1; Die helle Färbung und das Leuchten der Flamme gibt einen Hinweis auf höhere Flammentemperaturen).

Sehr gut ist die Problematik des Abstandes zwischen Gießpfanne und Brennerschild zu sehen. Ist der Abstand zu groß und die Positionierung der Pfanne über den Portalkran nicht optimal gelungen, ist ein Abstand bis zu 50 cm möglich. In dieser Konstellation verlängern sich Aufheizzeiten und Warmhaltephasen aufgrund hoher Wärmeabgaben und Verluste deutlich.

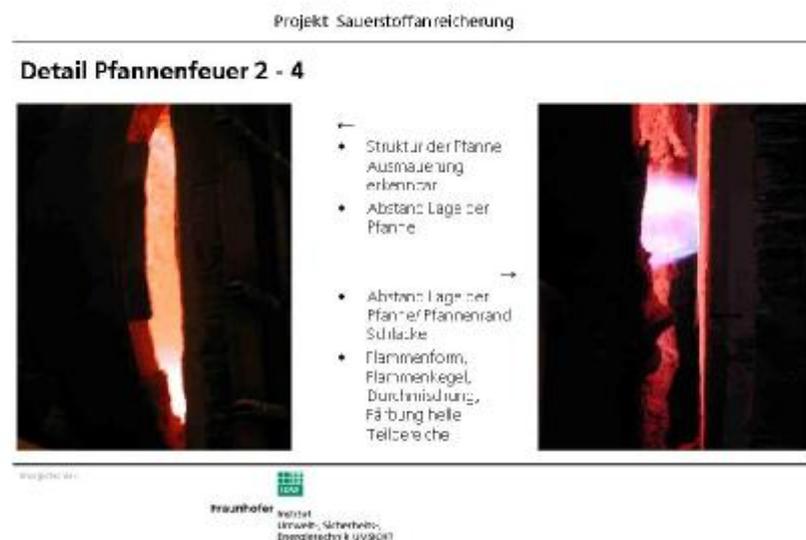
In der Seitenansicht (rechtes Foto) ist der Abstand Pfanne bzw. Pfannenrand zum Brennerschild gut zu erkennen. In der Praxis ergeben sich oft Probleme von Schlackenrändern, die einen optimalen Abstand von 5 – 10 cm verhindern. Entsprechende Pfannen werden regelmäßig auf den Zustand des Pfannenrandes vom Betriebspersonal begutachtet, gegebenenfalls bearbeitet (Wartungsintervall) oder aussortiert und im Rahmen eines Neuaufbaues der Ausmauerung wieder in den Pfannenkreislauf integriert.

Die Flammenform hat eine kegelartige Ausrichtung, ist weit aufgefächert und nicht optimal an die Pfanne angepasst (Flammenlänge, Flammengeometrie). Es sind unterschiedliche Helligkeiten oder Färbungen der ausgebildeten Flamme zu erkennen, die auf eine unterschiedliche ungleichmäßige Durchmischung der

Abgase und Brenngase hinweisen (s.a. Abbildung 22 Pfannenfeuer 2 vor Optimierung, Flammenkegel und Mischungszone).

Abbildung 5

Flammenbild
Pfannenfeuer 2 – 4



6.3 Versuchsaufbau Brennerkonzept, Optimierung

Aufgrund der Analyse des vorhandenen Brenners, des Leistungsbereiches, der Betriebsweise und des Flammenbildes ergaben sich folgende Optimierungsansätze:

- Bereitstellung von sauerstoffangereicherter Luft durch die Pilotanlage
- Übergabepunkt Gestaltung, Modifikation und Integration an das vorhandene Pfannenfeuer
- Änderung der Randbedingungen der Luftzusammensetzung und Mengenregelung, Austausch von Regelungskomponenten
- Anpassung des vorhandenen Brennersystems, Optimierung

Bei der Versuchsdurchführung war es entscheidend, keine zeitlichen Verzögerungen des Produktionsprozesses und der daran gekoppelten Prozessabläufe zu verursachen.

Daher wurden die Untersuchungen zu den Strömungsumlenkungen im eingesetzten Brennersystem und Brennerschild am Standort der Firma A&S Wärmetechnik durchgeführt.

6.3.1 Brennerstein – Strömungsumlenkung

Aufgrund der Betriebserfahrungen und Anforderungen (häufige Wartungsintervalle und Schadensursachen) ist es erforderlich, dass keine hohen Wärmebelastungen innerhalb des Brennersteines (Mischungsraum) entstehen. Diese führten in der Praxis zu hohen Materialbelastungen und einem erhöhten Verschleiß bzw. Materialdefekt. Teilweise bröckelte zu stark wärmebelastetes Material heraus, so dass die Flamme nicht mehr innerhalb der Pfanne zentral gehalten und positioniert war.

Die Folge waren aufwendige Reparaturzeiten und Zustellzeiten für Reparaturen des Brennerschildes, da aufgrund von Verarbeitungs- und Trocknungszeiten für die verwendeten Materialien ein Stillstand notwendig war. Aufgrund dieser Praxiserfahrungen werden 4 Pfannenfeuer vorgehalten, damit ausreichende Kapazitäten vorliegen.

Arbeitschritt 1 Aufbau und Inbetriebnahme

Es wurde ein entsprechend den Abmaßen am Standort TKN ein Pfannenfeuer aufgebaut und installiert (s.a. Kapitel 9 Anhang, Zeichnung 1 Versuchsaufbau Pfannenfeuer, Seite 59).

Insbesondere konnte der Brennerstein im Bereich des Erdgasbrenners durch austauschbare individuell angefertigte Bauteile bzw. Formsteine modifiziert und untersucht werden.

Einzelanfertigung der Baugruppen, Variation der Umlenkungen im Mischungsrohr (Abmaße 0,8 m x 0,8 m, Tiefe 0,3 m).

Arbeitschritt 2 Konstruktive Entwicklung der Strömungsumlenkungen

Konstruktive Entwicklung, Optimierung von Strömungsumlenkungen durch Untersuchung verschiedener Materialien, Stahl (hoch warmfest) und Keramikmaterialien, Bauform und Anordnung

Arbeitschritt 3 Einzelanfertigung der Bauteile, Brennersteine

Arbeitschritt 4 Tests zur Drallbildung, Auswertung

Im Kapitel 9 Anhang sind die Zeichnungen zu den untersuchten Umlenkungsvarianten dokumentiert:

Zeichnung 2 Strömungsumlenkung, Metall, Seite 60

Zeichnung 3 Strömungsumlenkung Keramik, Seite 61

Es wurden zum einen Strömungsumlenkungen aus hochwarmfestem Metallwerkstoff gefertigt. Hier wurde die Anzahl der Umlenkungen (Variante 1 - Anzahl 4 und Variante 2 - Anzahl 8), die Einbaulage (45° zur Achse gedreht) und die Länge der einzelnen Umlenkungen (Typ A- 40 mm, Typ B- 80 mm, Typ C- 120 mm) jeweils einzeln gefertigt und nachfolgend in einen Brennerstein eingesetzt. Der Metallring wurde dabei mit einer Überdeckung von ca. 20 mm mit Spezialmörtel eingebettet.

Anschließend wurden die Auswirkungen auf das Flammenbild vor allem in Bezug auf die Drallbildung untersucht. Die Untersuchungen der 6 Varianten führten bei folgender Konstellation bzw. Anordnung zu der besten Drallbildung der Flamme:

Variante 1, Typ B (15 x 80 x 40 mm), Anzahl Umlenkungen 4 St., 45 ° gedreht

Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurde des Weiteren der Einsatz von Keramik Material geprüft. In einer Versuchsdurchführung wurde der Einsatz von Feuerfestmaterial für die Strömungsumlenkungen getestet. Abbildung 6 zeigt verschiedene Rohstoffe, die Anwendungsgebiete und die Anwendungstemperaturen.

Es wurden drei unterschiedliche Bauteilgrößen (Typ A, Typ B und Typ C) untersucht und entsprechend jeweils ein Brennerstein gefertigt.

Eingesetzt wurden einzelne Umlenkungen aus Magnesit (Abmaße s.a. Zeichnung), welche Temperatureinsatzbereiche bis zu 1800 °C ermöglichen. Magnesit ist ein basisches Feuerfest Oxid mit einem Schmelzpunkt von ca. 2900 °C.

Auch hier zeigte sich mit den Bauteilen Typ B- 80 mm, Umlenkungen 4 St., 45 ° gedreht eine gute Drallbildung bei der Flammenform des eingesetzten Erdgasbrenners.

Abbildung 6

Keramik Materialien,
Anwendungsgebiete,
Temperaturen

Rohstoffeinsatz - Hauptanwendungsgebiete - Anwendungstemperaturen

Silika	Schamotte	Bauxit	Chromoxid	Korund	Zirkonoxid	Dolomit	Magnesit
Quarz	Feuerfest-Ton	Mischung	Chromerz	Aluminium-oxid	Baddelyit	Mischung	Magnesia
Glasindustrie	Alle Industrien	Alle Industrien	Stahl, Glas, Zement, Nichteisen	Alle Industrien	Stahlindustrie	Stahlindustrie	Stahl, Zement, Nichteisen
1600 °C	1300 °C	1500 °C	1700 °C	1650 °C	1800 °C	1750 °C	1800 °C
SAUER			NEUTRAL		BASISCH		

Quelle RHI Refractories

6.4 Messprogramm TKN

Die Pilotanlage zur Sauerstoffanreicherung wurde aufgrund der starken Staubbelastung innerhalb der Produktionshalle vorsorglich außerhalb aufgestellt. Die Halle wird alle 3 – 5 Tage durch ein Spezial Unternehmen, die mit Sonderfahrzeugen zur Reinigung ausgerüstet sind, gereinigt. Produktionsbedingt legt sich im gesamten Hallenbereich ein Feinstaub nieder, der sich dann zu einem gleichmäßigen pulverartigen „Staubteppich“ bis zu 2 - 3 cm Stärke aufbaut.

Die Gastrennung mittels innovativer Membrantechnik zeichnet sich durch geringen verfahrenstechnischen Aufwand aus. In einem Zeitraum von 8 Monaten wurde die Anlage erfolgreich im Dauerbetrieb gefahren. Unterbrechungen ergaben sich aufgrund eines Betriebs- und Produktionsstillstandes (aufgrund eines Brandschadens) von ca. 1 Woche, eines Anlagenausfalls bedingt durch eine fehlerhafte Schaltung eines Innenraumlüfters (Ausstieg der Anlage über Sicherheitsabschaltung) von 4 h und aufgrund eines Defektes eines Frequenzumrichters (Garantieaustausch) von 5 Tagen.

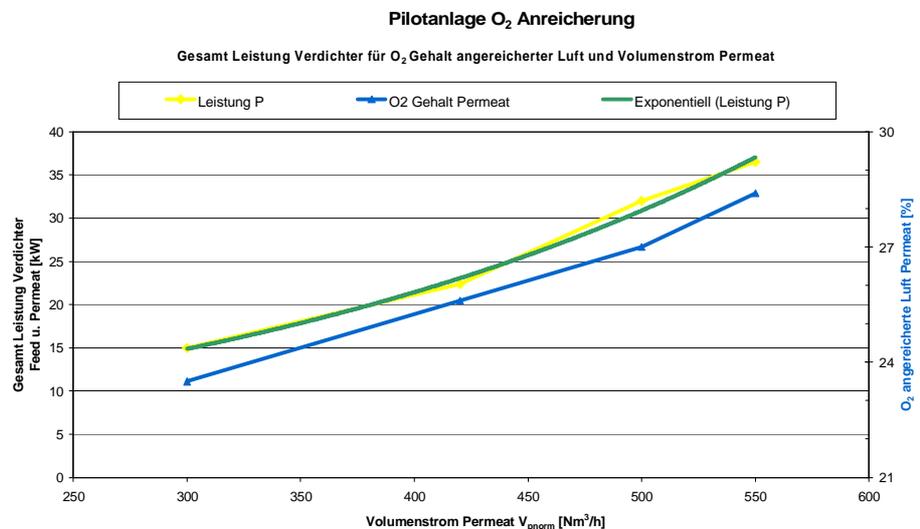
Diese sehr positiven Erfahrungen zeigen, dass die Technik der Sauerstoffanreicherung basierend auf innovativer Membrantechnik alltagstauglich einzusetzen ist. Regelmäßig (alle 14 Tage) wurden vorsorglich die integrierten Filterelemente bestehend aus einem Grobfilter und einem Feinraumfilterelement gereinigt. Das Trennverhalten der verwendeten Membran und die erreichbare Qualität der angereicherten Luft zeigten keine Veränderungen.

Die mit Sauerstoff angereicherte Luft kann mit einem wenig energieintensiven Verfahren bereitgestellt werden. So wird bei einer angereicherten Luftmenge von 550 Nm³/h mit Gehalten von 28,5 % O₂ eine Gesamtverdichterleistung für das Feed- und Permeat-Rootsgebläse von ca. 0,065 kW/Nm³ benötigt.

Abbildung 7 gibt eine Übersicht über die installierte Gesamtleistung der Verdichter auf der Feed- und Permeatseite in Abhängigkeit des Permeatvolumenstromes der angereicherten Luft (gelber Kurvenverlauf). Als Beispiel ist der qualitativ einstellbare O₂-Gehalt im Permeat Volumenstrom mit aufgeführt (Skalierung sekundäre y-Achse). Zur Bereitstellung von 420 m³/h angereicherter Luft mit einem O₂-Gehalt von ca. 26 % wird eine Leistung von 22,6 KW benötigt.

Abbildung 7

Leistung Gesamt Verdichter



Die Leistung P steigt exponentiell mit erhöhten Luftmengen und Sauerstoffgehalten. Volumenströme bis zu 550 Nm³/h V_{norm} Permeat können bei einem Druckniveau von 1,02 bar_{abs.} und bei Temperaturen von ca. 80 °C – 125 °C für Anwendungen zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der Entfernung zum Pfannenfeuer kühlt sich die Luft auf Umgebungstemperatur ab.

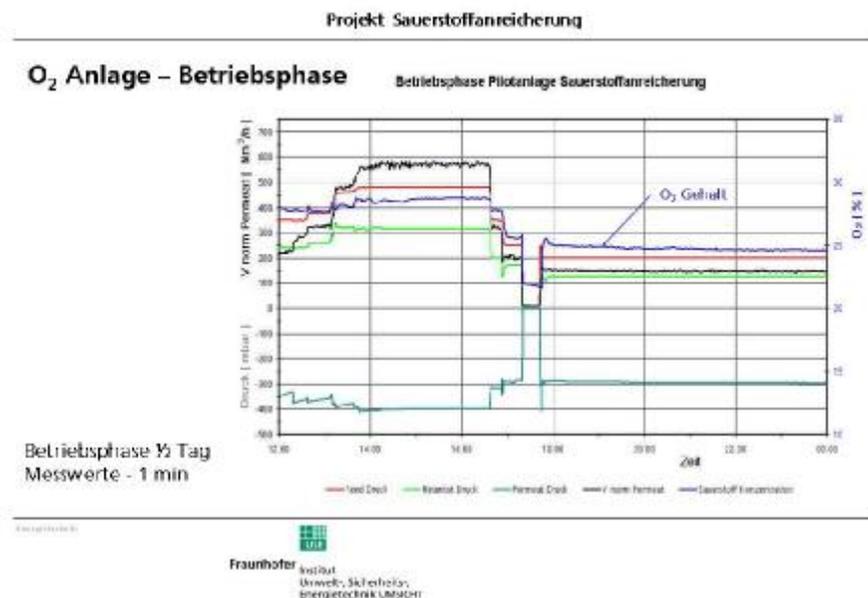
In Abbildung 8 sind unterschiedliche Betriebspunkte der Pilotanlage dokumentiert. Besonders hervorzuheben sind die geringen Druckniveaus von 1,35 -1,45 bar_{abs.} auf der Feedseite und der geringe Unterdruck von bis zu 0,6 bar_{abs.}, der auf der Permeatseite eingestellt wird. Die angereicherte Luft kann Anwendungen kontinuierlich zur Verfügung gestellt werden. Die Mengenregelung (V_{norm} Permeat) ist aufgrund der Zusammenfassung von mehreren Membranmodulen zu einer Baugruppe individuell einzustellen. Der

O₂-Gehalt der angereicherten Luft ist auf die sekundäre y-Achse skaliert und am blauen Kurvenverlauf zu erkennen.

Über die Prozesssteuerung und Visualisierung der Siemens S 7 Steuerung der Anlage sind die Prozessdaten dokumentiert worden. Im Rahmen der Auswertung sind in der Anlage 9.2 die Ergebnisse der Versuchsdurchführung dokumentiert. Für jeden Versuchstag sind Messwerte mit einer 15 Sekunden Taktung dokumentiert. Im Rahmen des Berichtes sind Auszüge im Anhang beigefügt. In den Jahresübersichten sind die Daten als 30 Minuten Werte dokumentiert.

Abbildung 8

Betriebsphase der Pilotanlage



6.4.1 Versuchsaufbau

Die zuerst verlegte Luftleitung aus flexiblen ALU Rohr in der Dimension DN 150 wurde durch eine größer dimensionierte Rohrleitung aus Wickelfalzrohr (verzinkt) DN 250 ersetzt. Bei dieser Dimensionierung sind die Druckverluste aufgrund der Leitungslänge und der Umlenkungen und Bögen geringer. Die Leitungslänge vom Standort der Pfannenfeuer betrug ca. 200 m (Dimension DN 250). Die Temperatur der zugeführten angereicherten Luft wurde wegen der Abkühlung mit Umgebungstemperatur von 20 °C am Pfannenfeuer zugemischt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Strömungsumlenkung (Drallbildung) wurden nachfolgend am Standort im Stahlwerk umgesetzt. Das Pfannenfeuer 1

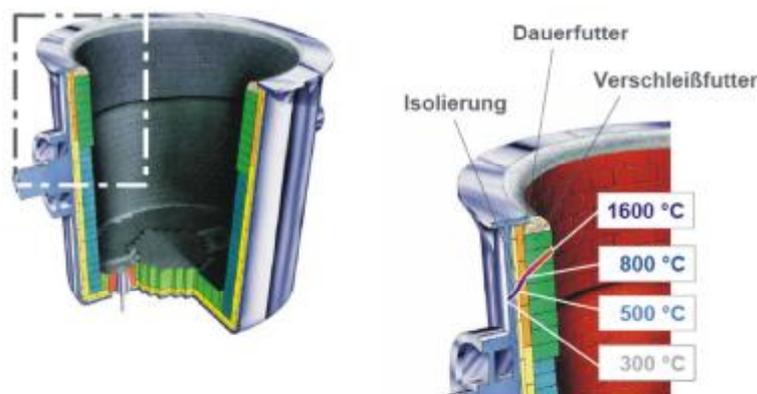
wurde mit den Keramik Umlenkungen im Brennerschild entsprechend der Vorgaben umgerüstet, Pfannenfeuer 2 wurde mit einem Metallring ausgerüstet.

In diesem speziellen Anwendungsfall der Erwärmung der Ausmauerung der Gießpfannen werden produktionsbedingt hohe Temperaturen benötigt (geforderte Wandtemperaturen bis zu ca. 1200 °C). Diese sind notwendig, damit der flüssige Stahl (Schmelzpunkt 1580 °C) beim Transport innerhalb der Produktion zunächst beim Einfüllvorgang sich mit der Ausmauerung nicht verbindet. Des Weiteren erfolgt in der Gießpfanne auch ein Veredelungsprozess durch Chargierung von notwendigen zusätzlichen Metallen zur genauen Legierungserstellung. Abbildung 9 zeigt den Aufbau eine Stahlpfanne aus Stahlmantel, Isolierung, Dauerfutter und Verschleißfutter.

Abbildung 9

Thermische Beanspruchung einer Stahlpfanne

Thermische Beanspruchung in einer Stahlpfanne



Quelle: RHI Refractories

Im Einzelnen wurden folgende Veränderungen und Optimierungen vorgenommen:

- Anpassung der Verbrennungsluftversorgung
- Integration der Sauerstoffanreicherung
- Anpassung der Volumenströme und Gasströme
- Austausch von Gleichdruckregler und Anpassung des Druckbereiches (untere Grenze 20 mbar)
- Reglereinstellung und Optimierung, PID Regler

- Integration der Strömungsumlenkung im Brennerschild, homogene Gemischbildung, Drall und Strömungsoptimierung
- Einbau der Pyrometermessung zur Dokumentation der Pfannenbodentemperatur, Vergleichsmessung zur Materialbelastung
- Optimierung und optimale Anpassung der Flammenform und Flammengeometrie, Länge an Gießpfanne mit den vorhandenen Brennereinstellungsoptionen

Aufgrund der sich ändernden Verbrennungseigenschaften können erhöhte Wärmestrahlungsanteile genutzt werden. Die Mechanismen der Wärmeübertragung aufgrund höherer Flammentemperaturen werden in Kapitel 6.5.2 erläutert.

6.4.2 Versuchsdurchführung

Die Anpassung und Modifikationen an vorhandene Brennersysteme erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner der Firma A&S Wärmetechnik. Mit Hilfe zu installierender Mess- und Regeltechnik wurden die vorhandenen Brenneranlagen optimal eingestellt.

Abgasanalyse / Temperaturmessung

Die Entnahme der Reaktionsprodukte erfolgte über die Pfannenschieberöffnung im Pfannenboden der Gießpfanne. Das Probengas wird über eine luftgekühlte Abgassonde aus der Gießpfanne entnommen und den Analysegeräten zugeführt. In der Zeichnung 6 Messrohr Abgas, Seite 59, ist die Abgassonde skizziert. Zur Kühlung der hohen Abgastemperaturen wurde Kühlluft eingesetzt. In dem Analysegerät wurden folgende Komponenten analysiert, O₂, CO₂, CO, NO_x. Die Abgasanalysen wurden stichprobenartig vorgenommen, da eine Online Messung in der Praxis während des Produktionsprozess dauerhaft an diesem Standort nicht durchführbar war.

Die Reglergröße im Brennerschild ist auf 700 °C eingestellt. Im Rahmen der Versuche wurde auch eine Pyrometermessung integriert, die die Pfannenbodentemperatur dokumentiert. Hier wurden Temperaturen von 1150 °C bis 1250 °C als Temperatur der Ausmauerung festgestellt.

Die Anlage zur Sauerstoffanreicherung wurde an Pfannenfeuer 1 angeschlossen und förderte einen konstanten Volumenstrom von 420 Nm³/h der Verbrennungsluft mit Gehalten von 26 % O₂ zu. Die weitere benötigte

Luftmenge wurde aus der Hallenluft beigesteuert. Die Bilanzierung der Volumenströme ist in der Auswertung dokumentiert.

Ein Verbrennungsluftverhältnis λ wurde über die Einstellungsmöglichkeiten der Gleichdruckregelung so geändert, dass ein Wert von $\lambda = 1,1$ eingestellt wurde. Die Bestimmung wurde über den Restgehalt an Sauerstoff im Abgas bestimmt.

Die Dokumentation des Dauerbetriebs der Pilotanlage ist in einer Gesamtübersicht von 15 Minuten-Werten im Anhang dokumentiert.

6.4.3 Auswertung der Versuche

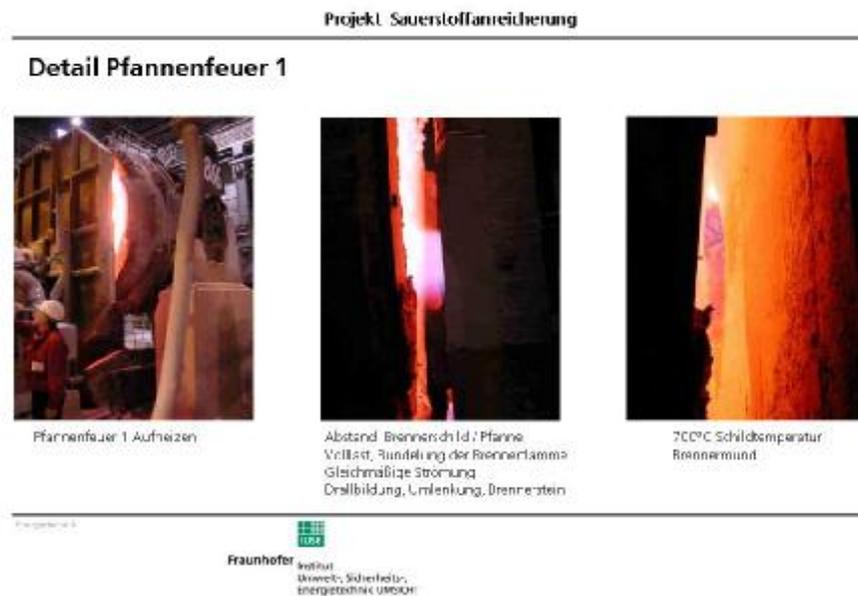
Aufgrund der energetisch günstig zu gestaltenden Wärmeübertragung kann gleichzeitig die erforderliche Leistung des Gasbrenners um bis zu 40 % reduziert werden. Die Möglichkeiten der Energieeinsparung ergeben sich auf Grund der strömungstechnischen Anpassung der Brennerkomponenten zur Stabilisierung der Flamme und optimalen Anpassung der Flammenlänge an die Gießpfanne.

In Abbildung 10 sind die helle Färbung und damit verbunden die höhere Gasstrahlung zu erkennen. Mit der angereicherten Luft werden deutlich höhere Flammentemperaturen erzielt. Die Flamme ist gebündelt und nicht so stark aufgeweitet (parallel und nicht kegelartig wie im nicht optimierten Zustand).

Das rechte Bild zeigt die Brenneröffnung (Brennermund). Die Flammenwurzel ist nicht innerhalb des Brennerschildes, sondern wird durch die Strömungsumlenkungen etwas weiter aus dem Brennermischungsrohr herausgeführt. Dies führt innerhalb des im Brennerschild ausgebildeten Brennermischungsrohr zu niedrigeren Temperaturbelastungen, erkennbar an der etwas dunkleren Färbung. Gleichzeitig werden so bewusst höhere Anteile an Abgas in den gut durchmischten Brenngasluftstrom mit angesaugt. Diese Abgasrezirkulation in Verbindung mit der Drallbildung der Strömungsumlenkung sorgt für einen zusätzlichen Impuls (tangentiale Geschwindigkeitskomponente), so dass eine parallele Flammenausbildung erkennbar wird. Die Maßnahme der Abgasrezirkulation bewirkt entgegengesetzt zur Sauerstoffanreicherung der Verbrennungsluft eine Senkung der Flammentemperaturen. Das optimale Zusammenspiel dieser beiden Maßnahmen (Mechanismen) ermöglicht eine optimale Verbrennung unter Einhaltung der Stickoxidemissionen.

Abbildung 10

Optimiertes Pf.-F. 1,
Details Flamme



Die Einsparpotenziale im optimierten Pfannenfeuerbetrieb sind in Abbildung 11 zum einen für den Vollastbetrieb und auch für den Teillastbetrieb aufgezeigt.

Die Betriebsdaten der Sauerstoffanreicherungsanlage sind mit den Basisdaten der Pfannenfeuer 1 und 2 (Datenmaterial TKN) über den Zeitstempel synchronisiert worden. An dem Übergabepunkt der Sauerstoffanreicherung wurde für einen automatisierten Betrieb ein Drucktransmitter installiert, PIR 3.3; im Vollastbetrieb wird entsprechend am Übergabepunkt ein Unterdruck von ca. 30 mbar gemessen. Man kann so die Zeitstempel der unterschiedlichen Datenquellen übereinander legen.

Es ist die sehr stabile Betriebsweise der Anlage zu erkennen. Konstant werden die Betriebspunkte gehalten und angereicherte Luft mit 26 % dem Pfannenfeuer zugeführt (PIR 1.2 – Feed Druck 1,35 bar_{abs.}, PIR 4.1- Retentat Druck 1,21 bar_{abs.}, PIR 3.2 – Permeat Druck 0,67 bar_{abs.}).

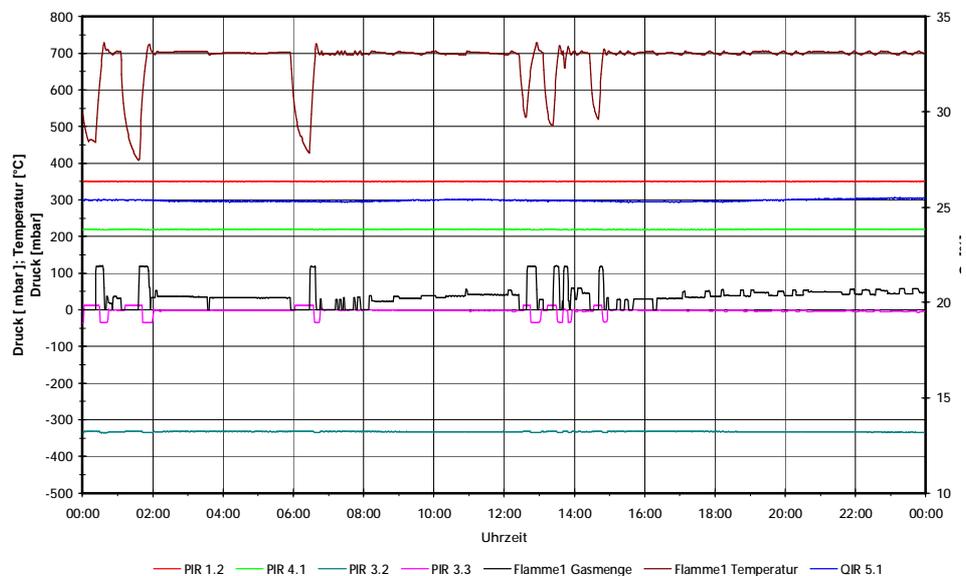
In dem Diagramm sind insgesamt 7 Pfannenwechsel dokumentiert. Die Aufheizkurven sind über die Temperaturmessstelle im Brennerschild dokumentiert. Die Sollwerttemperatur von 700 °C wird sehr schnell in ca. 35 Minuten, erkennbar an der steilen Kennlinie, erreicht (s.a. Beispiel 0:25 – 1:00 Uhr). Es ist ein kurzes Überschwingen des Reglers zu erkennen, dann wird im Haltebetrieb eine konstante Temperatur der Istwerttemperatur von 700 °C gehalten.

Für den Max-Betriebspunkt ist ein Erdgasverbrauch am Pfannenfeuer 1 von 120 m³/h dokumentiert. Dies entspricht einer Reduzierung des ursprünglichen Gasverbrauches von 200 m³/h um 40 %.

Auch die anderen Aufheizkurven zeigen nach dem Pfannenwechsel einen identischen Verlauf. Nach dem siebten Pfannenwechsel wurde die Pfanne über den Zeitraum von 15:00 bis 24:00 Uhr auf dem Pfannenplatz im Min-Betrieb kontinuierlich erwärmt. Für den Min-Betrieb ist eine Schwankungsbreite des Erdgasverbrauches von 35 – 75 m³/h zu erkennen, so dass man im Mittel von einem Erdgasverbrauch von 60 m³/h ausgehen kann. In dieser Zeit ist entsprechend der Schwankungen der Leistung ein deutliches Über- und Unterschwingen der Solltemperatur von 700 °C zu erkennen. Auch im Min-Betrieb ist eine Gasersparnis von 40 % möglich. Der Brenner arbeitet hier unter den vorgegebenen Randbedingungen im unteren möglichen Arbeitsbereich.

Abbildung 11

Gasverbrauchswerten u.
IST Temperatur Pf.-F. 1,
24.11.04



In Abbildung 12 sind für den 24.11.04 die Betriebsdaten Flamme 1 Temperatur und Flamme 1 Gas für das Pfannenfeuer 1 im optimierten Anwendungsfall und zum Vergleich die Betriebsdaten des Pfannefeuers 2 Flamme 2 Temperatur und Flamme 2 Gas gegenübergestellt.

An der in der flacheren Neigung der Kennlinie Flamme 2 Gas zu erkennenden Aufwärmphase im Max-Betrieb ist eine längere Aufheizzeit abzuleiten. Von 0:40 Uhr werden ca. 50 Minuten bis 1:30 Uhr benötigt, um die Solltemperatur für Pfannenfeuer 2 zu erreichen. Im Vergleich zum optimierten Pfannenfeuer 1 ist die Aufheizzeit von Pfannenfeuer 1 um 30 % kürzer als Pfannenfeuer 2.

Auch hier ist ein Reglerüberschwingen zu erkennen, jedoch ist die Schwankungsbreite höher. Das Über- und Unterschwingen hält deutlich länger an. Für den Max-Betriebspunkt ist ein Erdgasverbrauch am Pfannenfeuer 2 von 185 m³/h dokumentiert.

Für den Min-Betrieb ist eine höhere Spreizung, Gasverbrauchsschwankung, zwischen 150 m³/h und 90 m³/h (Tendenz fallend Richtung 50 m³/h) zu erkennen. Diese Schwankungen sind aufgrund der Sollreglervorgabe und Grundeinstellung Luft-Gas-Verhältnis des Brenners gegeben und verdeutlichen das Optimierungspotenzial im Bereich der Brennereinstellung. Es ergibt sich ein gemittelter Wert von ca. 120 m³/h. Im Min-Betrieb wird ein „stationärer“ Betriebszustand zwischen dem Wärmeeintrag der Flamme des Brenners und der Wärmeaufnahme der Pfanne im Zusammenspiel mit den sich einstellenden Wärmeverlusten der Pfanne an die Umgebung, Wärmeverlusten über das Abgas, welches in die Hallenumgebung abgeführt wird, und die „Kühlung“ durch Falschlufte verursacht. Durch den Unterdruck innerhalb der Gießpfanne, der aufgrund der geringeren Volumenströme im Min-Betrieb (Prinzip Injektorströmung der Flamme) entsteht, wird Umgebungsluft über den Spalt (Abstand zwischen Brennerschild und Gießpfannenrand) angesaugt.

Ab 3:50 Uhr ist das Pfannenfeuer 2 nicht im Betrieb und es ist die langsame Abkühlung zu sehen. Nach dem Schichtwechsel ist das Pfannenfeuer wieder in Betrieb genommen worden; es erfolgt eine Aufheizung von 300 °C im Max-Betrieb bis 16:00 Uhr. Die Temperatur von 700 °C wurde jedoch nicht erreicht. Dies spricht dafür, dass der Pfannenabstand in einem zu großen Abstand eingestellt war. Nach der Korrektur des Brennerschildabstandes ist wieder eine dem Standardbetrieb vergleichbare Kennlinie dokumentiert:

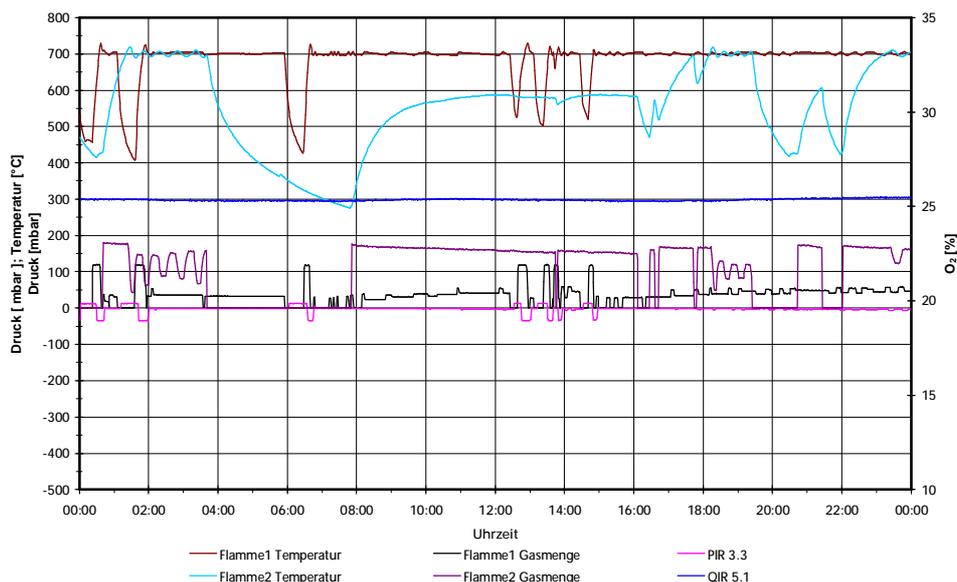
längere Aufheizzeit 50 Minuten, flache Kennlinie, Reglerüberschwingen, Max-Betrieb Erdgasverbrauch am Pfannenfeuer 2 von 185 m³/h, Min-Betrieb Schwankungsbreite Gasverbrauch am Pfannenfeuer 2 von 125 m³/h – 75 m³/h, Mittelwert 100 m³/h.

Um 17:50, 19:30 und 21:50 Uhr erfolgte jeweils eine Brennerabschaltung. Die Abkühlkurven entsprechen dem Verlauf der Abkühlung Beispiel 3:50 Uhr. Folgende Ergebnisse der Optimierung für Pfannenfeuer 1 sind zu dokumentieren:

- n Geringerer Erdgasverbrauch, im Max- und Min-Betrieb um 40 % reduziert
- n Gleichmäßige Aufwärmung aufgrund besserer Wärmerübertragung durch Strahlung
- n Kürzere Aufheizzeiten (Kennlinie steiler), um 30 % reduziert
- n Geringeres Reglerschwingen

Abbildung 12

Vergleich Aufheizkurven
Pf.-F. 1, opt. u. Pf.-F. 2,
24.11.04



Analyse Kohlendioxidemissionen

In der nachfolgenden Analyse wird die Verringerung des Kohlendioxid-ausstosses betrachtet.

Der Erdgasbrenner mit einer Leistung von 2 MW benötigt eine Brennstoffmenge von 200 m³/h Erdgas.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die umweltrelevanten Daten eines 2 MW-Gasbrenners. In einer ersten Betrachtungsweise sind die Daten für einen konstant gehaltenen Erdgasbedarf von 200 m³/h für eine zugeführte Luftmenge mit 21 % und 25 % Sauerstoff aufgeführt. Unter der Randbedingung der Nutzung der angereicherten Luft mit 25 % O₂ ergibt sich eine Verringerung des Mindestluftfaktors für eine vollständige Verbrennung von 9,81 auf 8,22. Das bedeutet bei Betrachtung der absoluten Werte und der Voraussetzung eines gleich bleibenden Leistungsbedarfs eine Reduzierung der zugeführten Luftmengen von 2158,2 m³/h auf 1808,4 m³/h.

Die bei der Verbrennung entstehenden Abgasmengen reduzieren sich von 1966 m³_{Abgas trocken} auf 1630 m³_{Abgas trocken}. Dies entspricht einer Reduzierung von 17 %.

Tabelle 2

Umweltrelevante Daten
für ein Pfannenfeuer

Pfannenfeuer, Leistung 2 MW		
Erdgasbedarf, Heizwert 10 kWh/m ³ Gas	200	m ³ /h
Luftverhältnis	1,1	
Mindestluftfaktor bei O ₂ von 21 %	9,81	
Luftmenge mit 21 % Sauerstoff	2158,2	m ³ /h
Abgasmenge feucht V Abg _{0,f.}	11,72	m ³ Abgas/m ³ Gas
Abgasmenge feucht, abs.	2344	m ³ Abgas feucht
Abgasmenge trocken V Abg _{0,tr.}	9,83	m ³ Abgas/m ³ Gas
Abgasmenge trocken, abs.	1966	m ³ Abgas trocken
Mindestluftfaktor bei O ₂ von 25 %	8,22	
Luftmenge mit 25 % Sauerstoff	1808,4	m ³ /h
Abgasmenge feucht V Abg _{0,f.}	10,04	m ³ Abgas/m ³ Gas
Abgasmenge feucht, abs.	2008	m ³ Abgas feucht
Abgasmenge trocken V Abg _{0,tr.}	8,15	m ³ Abgas/m ³ Gas

Die Messergebnisse haben gezeigt, dass die Anpassung der vorhandenen Anlagentechnik eine Verringerung der benötigten Brennerleistung bewirkt und damit der notwendige Erdgasvolumenstrom um 40 % verringert werden kann. Dies stellt sich aufgrund der besseren Wärmeübertragung durch Strahlung ein. Eine Reduzierung der Erdgasmenge bedeutet eine deutliche ressourcenschonende Betriebsweise.

Tabelle 3 zeigt die erforderliche Leistung für den Max- und Min-Betrieb, die technischen Daten der Verbrennungsluftmenge und Abgasmengen nach der Optimierung. Im Max-Betrieb reduziert sich aufgrund der effektiven Wärmeausnutzung der Erdgasbedarf auf 120 m³/h, d.h. eine Leistung von 1,2 MW. Die Abgasmenge trocken reduziert sich auf 978 m³_{Abgas trocken} und entspricht so ca. 50 % der ursprünglichen Abgasmenge bei einem 2 MW Pfannenfeuer.

Tabelle 3

Leistungsbereich u.
Technische Daten Pf.-F. 1
nach Optimierung

Betriebsdaten nach Optimierung		
Max Betrieb Erdgasbedarf, Heizwert 10 kWh/m ³ Gas	120	m ³ /h
Luftverhältnis	1,1	
Mindestluftfaktor bei O ₂ von 25 %	8,22	
Luftmenge mit 25 % Sauerstoff	1085	m ³ /h
Abgasmenge feucht V0	10,04	m ³ Abgas/m ³ Gas
Abgasmenge feucht, abs.	1204,8	m ³ Abgas feucht
Abgasmenge trocken V0	8,15	m ³ Abgas/m ³ Gas
Abgasmenge trocken, abs.	978	m ³ Abgas trocken
Min Betrieb Erdgasbedarf, Heizwert 10 kWh/m ³ Gas	60	m ³ /h
Luftverhältnis	1,1	
Mindestluftfaktor bei O ₂ von 25 %	8,22	
Luftmenge mit 25 % Sauerstoff	543	m ³ /h
Abgasmenge feucht V0	10,04	m ³ Abgas/m ³ Gas
Abgasmenge feucht, abs.	602	m ³ Abgas feucht
Abgasmenge trocken V0	8,15	m ³ Abgas/m ³ Gas
Abgasmenge trocken, abs.	489	m ³ Abgas trocken

In der Tabelle 4 sind die CO₂-Äquivalente durch Einsparung an Erdgas aufgeführt.

Die Optimierung der Pfannenfeuer hat gezeigt, dass bei der Betriebsweise im Max-Betrieb 80 m³/h Erdgasersparnis zu erzielen ist und gleichzeitig die Aufheizzeiten sich um 30 % verkürzen.

Im Min-Betrieb können die vorhandenen Brenner aufgrund der einzuhaltenden Strömungsgeschwindigkeit nicht weiter herunter geregelt werden, so dass hier eine Ersparnis bei der vorhandenen Anlagentechnik von 40 m³/h erreicht werden kann.

Ausgehend von einer Auslastung und Verteilung der Betriebsweise am Standort TKN im Min- und Max-Betrieb zu 2/3 und 1/3 (jeweils 16 h bzw. 8 h/Tag) ergibt sich eine Einsparung von 865,9 t CO₂-Äquivalente bei der Betrachtung des Zeitraumes eines Jahres.

Bei der Anzahl von 4 Pfannenfeuern ist der entsprechende Faktor zu berücksichtigen und es können ca. 3464 t CO₂-Äquivalente/Jahr eingespart werden.

Abbildung 13

CO₂-Äquivalent durch
Einsparung an Erdgas

CO ₂ -Äquivalent durch Einsparung an Erdgas - Vermeidung von Emissionen im Stahlwerk				
Erdgas [m ³]	CH ₄ -Gehalt [%]	Menge CH ₄ [m ³]	Gewicht CH ₄ [kg]	CO ₂ -Äquivalent [t]
Einsparung Max Betrieb			80 m ³ /h * 8 h * 365 Tage	
Einsparung Min Betrieb			40 m ³ /h * 16 h * 365 Tage	
467.200	94	439.168	314.883	865,9
Umrechnungsfaktor CH ₄ zu CO ₂ x 2,75 Randbedingung Untersuchung an 1 Pfannenfeuer				

Betrachtung der Stickoxidemissionen

Nach der Optimierung der Flammgeometrie (Länge und Form) und Flammentemperatur sind aufgrund von konstruktiven Verbesserungen Rezirkulationszonen und gleichzeitig stabile gut durchmischte Flammen (Drallbildung) einzustellen.

Die Stickoxidemission (NO_x) als Sammelbezeichnung für alle Oxide des Stickstoffs wie z.B. Stickstoffmonoxid NO, Distickstoffoxid N₂O und Stickstoffdioxid NO₂ entstehen als Nebenprodukte aus dem organisch gebundenen Stickstoff und dem Luftstickstoff bei Verbrennungsprozessen. Für die Entstehung gibt es drei verschiedene Bildungsmechanismen. Thermisches NO_x entsteht bei hohen Temperaturen. Promptes NO_x bildet sich bei der Brennstoffumsetzung unter Überschuss von atomarem Sauerstoff und wird über Kohlenwasserstoffe katalysiert. Brennstoff-NO_x ist im Brennstoff gebunden und wird bereits bei mäßigen Temperaturen oberhalb 650 °C freigesetzt.

Bei dem stickstoffarmen Brennstoff Erdgas sind die Stickoxidemissionen bei Temperaturen oberhalb 1300 °C fast ausschließlich auf den thermischen NO_x-Bildungsmechanismus zurückzuführen. Im Rahmen der Optimierung werden

prinzipiell höhere Verbrennungstemperaturen bewusst realisiert, gleichzeitig mit dem veränderten erhöhten Sauerstoffanteil der Luft auch effektiv weniger Stickstoff zugeführt.

Faktoren, welche die Entstehung und Menge von NO_x beeinflussen, sind Temperatur, Sauerstoffangebot bzw. Luftüberschuss, Stickstoffgehalt im Brennstoff, mit der Verbrennungsluft zugeführte Stickstoffmenge, Betriebsweise (Grundlast, Anfahren, Lastfolge), Verweilzeit, Grad der Verschmutzung, Anteil an anderen Brennstoffen und sonstigen Emissionen mit möglichen Katalyseeffekten.

Die Abgasmenge beim optimierten Pfannenfeuer beträgt nur noch 50 % der Abgasmenge eines 2 MW-Erdgasbrenners. Die Abgasmenge (trocken) reduziert sich auf $978 \text{ m}^3_{\text{Abgas trocken}}$ im Max-Betrieb. Es sind effektiv Emissionseinsparpotenziale zu realisieren. Unter Einhaltung der Grenzwerte der TA Luft sind auf Grund der Leistungsanpassung und Optimierung eines Pfannenfeuers Stickoxidreduzierungen möglich. Zusätzlich haben die verkürzten Aufheizzeiten einen weiteren Einspareffekt.

Die Abgaswerte der NO_x liegen innerhalb der Grenzwerte. Der zulässige Emissionsgrenzwert für Stickoxide der TA Luft von 1986 betrug $200 \text{ mg/m}^3_{\text{Abgas}}$ und ist für die Anlagen gültig. Der Schadstoffemissionsgrenzwert für Stickoxide der aktuellen TA Luft beträgt $150 \text{ mg/m}^3_{\text{Abgas}}$. Der Wert ist auf einen Restsauerstoffwert im Abgas von 3 % bezogen.

6.5 Brennerkonzept-Auslegungsgrundlagen

Die Untersuchungen des Pannenfeuers haben gezeigt, dass erhebliche Einsparungen möglich sind.

Die Grenzen der Optimierungspotenziale sind durch die Randbedingungen Strömungsgeschwindigkeiten und Druckniveau im Min-Betrieb gesetzt.

Der Brenner arbeitet hier unter den vorgegebenen Randbedingungen im unteren möglichen Arbeitsbereich. Die Strömungsgeschwindigkeiten des Brennstoff-Luft-Gemisches sind gerade ausreichend, um eine stabile Flammenform zu erhalten. Die hohe Schwankungsbreite der Gasmenge im Min-Betrieb verursacht instabile Flammen, die wiederum die Gemischbildung beeinflussen und nachfolgend inhomogene Mischungszonen verursachen.

Um auch im Min-Betrieb die Leistung zu reduzieren, sind an dem Brennersystem konstruktive Veränderungen (Querschnittsverminderung der

Mischstrecken und Brennerrohre zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten; Kontinuitäts-Gleichung) notwendig.

Das Druckniveau muss auf die Randbedingungen der einzusetzenden Gleichdruckregler für Luft und entsprechend auf den Regler in der Gasleitung abgestimmt sein.

Die für die Gasregelstrecke vorgeschriebenen Bauteile gemäß Thermoprozessanlagen Verordnung EN 746, Teil 2 (s.a. Zeichnung 1), handbetätigtes Absperrventil, Filter/ Siebe, Sicherheitsabsperrventile, Gasdruckregler, Strömungs- und Druckwächter sind entsprechend der Herstellerangaben (z.B. Bauteile Hersteller Kromschroder) zu integrieren.

Das bedeutet, dass bei der Auslegung und Dimensionierung der Brennerkomponenten auch die spiralförmigen Bleche im Brennerkopf anzupassen sind.

Der Leistungsbereich des Brenners ist in Kombination mit O₂-angereicherter Verbrennungsluft von dem ursprünglichen Arbeitsbereich (0,8 bis 2,4 MW) auf einen Leistungsbereich von 0,2 – 1,4 MW zu reduzieren.

6.5.1 Einfluss der Strömungsumlenkung

Brenneroptimierung

Die Vermischung von Erdgas und zugeführter Luft erfolgt im Brennerkopf. Hier sind in dem eingesetzten Brennertyp Umlenkungsbleche spiralförmig angeordnet und bewirken eine möglichst homogene Vermischung. Hier wird auch ein erster Drallimpuls auf die sich einstellende Flamme aufgebracht. Die chemische Umsetzung findet zum größten Teil bereits im Flammrohrbereich bzw. in dem im Brennerschild ausgebildeten Zylinder statt. Die Umlenkungen bewirken eine Strömungsumlenkung (tangentiale Geschwindigkeitskomponente) und erzeugen einen weiteren Drall. Es entsteht eine stabile parallel ausgebildete Flammenform.

Die homogene Gemischbildung wird durch den erhöhten Sauerstoffanteil in der Verbrennungsluft verbessert. Es werden so höhere Verbrennungstemperaturen realisiert. Die Flammenwurzel wird weiter aus dem Mischungsrohr herausgeführt. Des Weiteren ist eine gesteigerte Zuführung höherer Anteile an Abgas möglich (Rezirkulation - Effekt Absenkung Flammentemperatur). Das Zusammenspiel führt insgesamt zu höheren Flammentemperaturen und zu Emissionen innerhalb der gesetzlichen Grenzwerte.

Abbildung 14

Umlenkung Pf.-F 2,
Metallring



Sowohl die Ausführung mit dem Metallring, als auch die Keramik Umlenkungen sind während der Versuchsphase dauerhaft einsetzbar gewesen (kein Verschleiß oder defekt). Von der Praxistauglichkeit her, ist der Metallring wegen der eindeutig festgelegten Lage und vereinfachten Positionierung günstiger im Rahmen von Instandhaltungs- und Wartungsintervallen zu installieren.

6.5.2 Mechanismen Wärmeübertragung – Wärmeübertragung durch Strahlung

Die Mechanismen des Wärmetransports sind Konvektion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Strahlung und Konvektion spielen in Industrieöfen als Wärmeübertragungsmechanismus von der Flamme und dem Abgas auf die Umgebung (Wandtemperaturen) die entscheidende Rolle.

Die von einem Körper emittierte Strahlung hängt ab von Temperatur, Wellenlänge, Material und Oberflächenbeschaffenheit. Der Wärmestrom durch Strahlung wird in einfacher Form durch die Gleichung nach Stefan - Boltzmann ausgedrückt. Maßgeblichen Einfluss hat die Temperatur, die proportional T^4 eingeht.

Abbildung 15 verdeutlicht diesen Einfluß am Beispiel des Nettowärmestrom austausches zweier diffuser Strahler (Strahlungsaustausch zwischen 2 Platten) unterschiedlicher Temperatur.

In einer vereinfachenden Näherung wird der resultierende Emissionsgrad c_{12} mit den Stoffgrößen (Platte 1 und 2) ins Verhältnis zur Boltzmann-Konstante σ

gesetzt. Der Emissionsgrad der Abgase oder der Flamme c_G ist bei konstanter Zusammensetzung hauptsächlich von der effektiven Gasschichtdicke s und der Temperatur abhängig.

Im Gegensatz zur Strahlung geht bei dem Wärmestromtransport durch Konvektion die Temperatur nur linear ein:

$$Q_{\text{Konvektion}} = A \alpha (t_{\text{gas}} - t_{\text{wand}})$$

(A Wärmeübertragungsfläche, α Wärmeübergangskoeffizient, t Temperatur)

Abbildung 15

Mechanismus
Wärmestrahlung

Projekt Sauerstoffanreicherung

Mechanismen des Wärmetransport

- **Wärmestrahlung**
- die von einem Körper emittierte Strahlung hängt ab von
 - Temperatur
 - Wellenlänge
 - Material & Oberflächenbeschaffenheit
- Stefan-Boltzmann Gesetz
Gesamtemission in Halbraum

$$E_s(T) = \sigma T^4$$

- **Strahlungsaustausch 2 Platten**
Nettowärmestrom diffuse Strahler von 1 → 2

$$\dot{Q}_{12} = A c_{12} (T_1^4 - T_2^4);$$

$$c_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

Mit O_2 -angereicherter Luft können höhere Verbrennungstemperaturen erzielt und somit der Wärmetransport durch Strahlung erhöht werden. In der Abbildung 16 (Seite 39) ist die theoretisch berechnete adiabate Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes in der zugeführten Verbrennungsluft dargestellt. Die adiabate Verbrennungstemperatur ist über die Bilanzierung einer ideal verlaufenden Verbrennung von Erdgas bei der Randbedingung von einem Luftverhältnis von $\lambda = 1,05$ berechnet worden. Weitere Randbedingung in der Berechnung ist, dass Brenngas und Verbrennungsluft mit der gleichen Temperatur zugeführt werden. Die Abbildung 16 zeigt die Steigerung, die sich mit O_2 -angereicherter Luft einstellt. Bei 21 % Sauerstoff in der zugeführten Luft ist eine Temperatur von

ca. 1950 °C ist zu erzielen. Mit erhöhten Sauerstoffgehalten von 28 % O₂ sind ca. 2450 °C zu erreichen.

Die höhere Gasstrahlung und gleichzeitig geringeren Inertgasanteile an Stickstoff, die eine geringere Kühlung der Flamme bewirken, ermöglicht eine erhebliche Steigerung der Wärmestrahlung. Wandtemperaturen werden schneller gleichmäßig aufgeheizt und ermöglichen eine Leistungsreduzierung der eingesetzten Erdgasmenge (Primärenergieersparnis, CO₂-Einsparung, geringere Abgasmengen).

6.5.3 Betriebsoptimierung – weitere Einsparpotenziale

Die Gießpfannen mit einem Fassungsvermögen von 80 t Stahl werden in einem festgelegten Aufheizvorgang auf die gewünschten Temperaturen erwärmt. Der Produktionsbetrieb erfolgt im Drei-Schichtbetrieb. Es werden jeweils 8 Pfannen im Kreislaufbetrieb vorgehalten. Die Ausmauerung einer Pfanne wird nach der Dauer von ca. 15 Tagen komplett erneuert, da sich die Wandstärken aufgrund der Füllvorgänge und Pfannenabgüsse vermindern. Die Anpassungen an den Brennern haben keine negative Änderung der Zustellzeiten verursacht.

Weitere Einsparpotenziale ergeben sich durch folgende Verbesserungen.

6.5.3.1 Halterung der Pfanne, Positionierung

Die Gießpfannen werden über den Portalkran auf die Haltepunkte eines Pfannenfeuers gesetzt. Durch den Neigungswinkel der angrenzenden Flächen erfolgte eine Zentrierung in der senkrechten Achse. Die Halterung der Gießpfanne ist in Zeichnung 5 Wärmetauscher Variante B, Brennerschild, Option Optimierung im Detail skizziert (s.a. Anhang). Beim Absenken der Pfanne erfolgt eine Ausrichtung in die waagerechte Endlage. Das Brennerschild wird manuell durch einen Facharbeiter an die Pfanne herangefahren und in Betrieb genommen.

Eine genaue Ausrichtung in der Mitte der beiden Halterungspfeile ist nicht immer gegeben, so dass das Brennerschild im Extremfall nicht die Gießpfanne komplett abdeckt. Leichte Fehlpositionierungen haben Auswirkungen auf den Abstand zwischen Pfannenrand und Brennerschild. Die Folge sind deutlich längere Aufheizzeiten, gegebenenfalls werden Solltemperaturen nicht erreicht.

Durch weitere Zentrierungsanlageflächen und Gestaltung des passenden Gegenstückes an jeder Gießpfannhalterung kann diesen Fehlpositionierungen entgegengewirkt werden. Ein konstruktiver Vorschlag ist in Zeichnung 5 aufgezeigt.

6.5.3.2 Einfluss der Luftvorwärmung

In der Abbildung 16 ist neben der theoretisch berechneten adiabaten Verbrennungstemperatur in Abhängigkeit des Sauerstoffgehaltes in der zugeführten Verbrennungsluft auch der Einfluss einer Luftvorwärmung dargestellt.

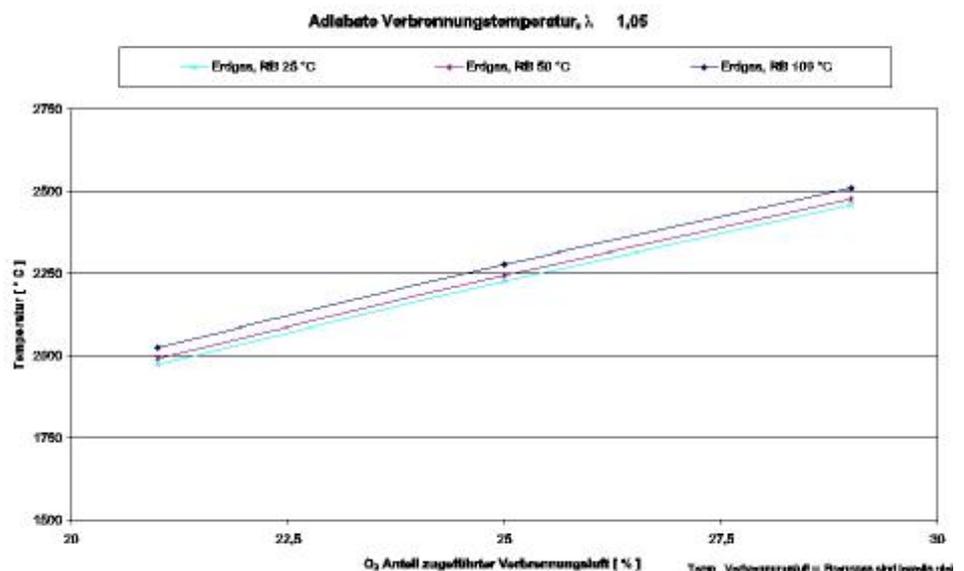
Beispiel-Randbedingung: Erdgas und Luft werden mit 25 °C zugeführt.

Mit einem steigenden Sauerstoffgehalt in der Verbrennungsluft von 21 % auf 25 % vergrößert sich auch die berechnete Temperatur von ca. 1950°C auf ca. 2225 °C.

Eine Vorwärmung des Erdgases und der Luft auf 100 °C bewirkt eine weitere Temperatursteigerung. Diese ist durch die Parallelverschiebung des Temperaturverlaufes sichtbar.

Abbildung 16

Adiabate Verbrennungs-
Temperatur, Einfluss
Vorwärmung



Für die Gestaltung einer Luftvorwärmung für die Pfannenfeuer gibt es unterschiedliche Ansätze und Konstruktionen.

Zwei Varianten sind exemplarisch im Anhang in Zeichnung 4 Wärmetauscher Brennerschild, Option Optimierung und in der Zeichnung 5 Wärmetauscher Variante B, Brennerschild, Option Optimierung aufgeführt.

Zeichnung 4 integriert einen Wärmetauscher im Brennerschild. Bei dieser Konzeption durchströmt die Luft parallel angeordnet Rohrleitungen, die innerhalb des Brennerschildes in Spezialmörtel eingebettet sind. Zeichnung 5 zeigt die Variante eines Strahlungsschildes, welches auf der Rückseite einen Wärmetauscher integriert.

Es gibt auch Systemlösungen, die mit erhöhtem Investitionsaufwand auch Vorwärmungen bis zu 400 °C realisieren. Zum Beispiel das so genannte Drehsystem des Herstellers Rothemühle. Es handelt sich um ein System mit einem Drehrohr-Regenerator, bei dem die Abgase aus dem Pfannenfeuer gezielt über Speichermassen (rotierend) geführt werden, diese abschnittsweise erwärmen und anschließend an die Verbrennungsluft die Wärme abführen.

6.5.3.3 Koordination / Pfannenfeuerwechsel

Ein wesentlicher Beitrag zu Verbesserung ist auch durch qualifiziertes Fachpersonal erreichbar. Der aufmerksame und verantwortungsvolle Mitarbeiter kann viele „kritische“ Prozessrandbedingungen wie Abstandskontrollen am Brennerschild und Pfanne oder Positionierungsfehler korrigieren. Ergänzend können beispielsweise Anlagenbauteilpositionen durch Endschalter und Positionierungspunkte, die mit Freigaben innerhalb der Regelungskette einhergehen, verknüpft werden.

Durch Qualifizierungsmaßnahmen sind die Aspekte der Produktions- und Prozessabläufe den Mitarbeitern aufzuzeigen. Der Dreischichtbetrieb und die unterschiedliche Personenanzahl erfordert eine kontinuierliche Dokumentation der Teilprozesse. Am Arbeitsplatz Pfannenfeuer sind sehr hohe Arbeitsplatzbelastungen durch Wärme und Staub gegeben. Ansätze bestehen in der Teambildung (Vorarbeiter - Team) und Durchführung wechselnder Arbeitsschritte innerhalb der Schicht. TKN legt auf diese Personalentwicklung und Weiterbildung sehr viel Wert und motiviert zusätzlich die Mitarbeiter durch interne Programme (Gratifikation, Vorschlagswesen für Verbesserungen).

Für die Zustellungszeiten, Pfannenkreislauf der Pfannenfeuer, Wartungswechsel, etc. bestehen Rechner und programmgestützte Erfassungssysteme. Bisher nicht dokumentiert sind die Durchlaufzeiten und Rücklaufzeiten der Pfannen. So benötigen stark ausgekühlte Pfannen längere Aufheizzeiten, noch sehr warme Pfannen aus dem Produktionsprozess sind schnell zu erwärmen. Hier besteht ein Verbesserungspotenzial in der Koordination von Pfannenvorhaltung, -bereitstellung und -wechsel.

6.6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Pfannenfeuer werden zeitlich sehr unterschiedlich im Betriebsablauf eingesetzt. Nicht alle Pfannenfeuer werden gleichzeitig genutzt. So wird ein Pfannenfeuer nur als Reserve im Reparaturfall oder Wartungsintervall mit integriert. Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde folgender Auslegungsfall zu Grunde gelegt. Annahme: Die Pfannenfeuer sind für Betriebsweisen mit angereicherter Luft umgerüstet und optimiert eingestellt, es ergibt sich eine Anlagenkonzeption für 3 Pfannenfeuer im Regelbereich von 540 kW bis 1,2 MW/je Feuer. Die Randbedingung der Luftmenge beträgt maximal 3180 m³/h Luft mit 25 % O₂.

Die Auslegung erfolgt für den Betrieb von zwei Feuern im Min-Betrieb und einem Feuer im Max-Betrieb, d.h. für 2,28 MW. Dies entspricht einer Konzeption einer Anreicherungsanlage für 2050 m³/h und einem Größenfaktor 4 der derzeitigen Pilotanlage (Konzeption Container-Anlage, Komponenten, WT, Verdichter, SPS, Elektroinstallation, Dämmung, Membranmodule, Systemanbindung). Es wurden Annahmen von 6000 h Betriebsstunden für die Min und 1750 h für die Max-Betriebsweise festgelegt. Details sind der Abbildung 17 für die Konzeption mit Membrantechnik zu entnehmen.

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die kapitalgebundenen Kosten (Investition) und die Ausgaben für Strom (Eigenbedarf für Verdichter), Wartungskosten und weitere Kosten den Einnahmen gegenübergestellt.

Die Einnahmen sind entsprechend der Erdgasersparnis von 40 % und einem für die Industrie vergleichsweise sehr niedrigen Erdgaspreis von 1,525 ct/kWh errechnet worden.

Der aktuelle Erdgaspreisvergleich für EU Industrieerdgaspreise des VIK Verbandes liegt für Deutschland bei 2,08 ct/kWh. Auch die Stromkosten entsprechen mit 3,5 ct/kWh dem unteren Wert der europäischen Vergleichswerte des VIK Verbandes (Deutschland Strompreis inkl. Steuern ohne MWSt. 8,4 ct/kWh).

Für einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren sind zum Vergleich Preissteigerungen mit einem Zinssatz von 3 % dokumentiert

Bei Investitionskosten für eine Anlagenkonzeption mit innovativer Membrantechnik von 265.000 € ist in diesem Fallbeispiel eine Amortisationsdauer von 4,9 Jahren realisierbar. Die Kostenkalkulation basiert auf den Erfahrungen des Pilotanlagenbaues und berücksichtigt Verbesserungspotenziale in der Modulgestaltung, Montage und Fertigung.

Abbildung 17

Wirtschaftlichkeit O₂
Membrankonzept

Z1	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG									
Z2	O₂ Membrananlage									
Z3										
Z4	Versorgung von 3 Pfannenfeuer Auslegung 2 Min., 1 Max.									
Z5										
Z6	Pfannenfeuer Min	Leistung		540	kW	Ersparnis		Erdgas		
Z7	Pfannenfeuer Max	Leistung		1200	kW			360,0 kW		
Z8	Anzahl		3					800,0 kW		
Z9								5.720.000,0 kWh/Jahr		
Z10	Jahresbetriebsstunden :		7750	Min Betrieb [h]	6000	1750	Max Betrieb [h]	572.000,00		m3 Erdgas/ Jahr
Z11	Gesamtleistung (kW) :	2	Pf.-F.	1.080,00	kW			0,40		Erdgasersparnis
Z12	Gesamtleistung (kW) :	1	Pf.-F.	1.200,00	kW					
Z13	Eigenbedarf :			60,00	kW			14.300.000,00		kWh/Jahr
Z14	Nettoleistung :				kW			1430000		m3 Erdgas/ Jahr
Z15										
Z16	Leistung Gesamtmenge erdgas	Max		8.580.000,0	kWh			Erdgaskosten im Jahr		130.845,00
Z17			3 Pf.-F.	858.000,0	m3 Erdgas/ Jahr					EURO / Jahr
Z18										
Z19	benötigte Verbrennungsluft 21 % O ₂	1,05	10	9.009.000,0	m3 Luft / Jahr			Anlage		Membran O ₂
Z20	benötigte Verbrennungsluft mit	0,25		7.567.560,0	m3 Luft / Jahr			864		m3/h
Z21	Mischung von Luft mit 21 % O ₂ und 79% N ₂			7.184.392,4	m3 Luft / Jahr			960		m3/h
Z22	Sauerstoff Netz 99 % O ₂			383.167,6	m3 O ₂ / Jahr			2050		m3/h
Z23										
Z24	Kosten									
Z25	Investition									
Z26	O ₂ Membrananlage									
Z27	incl. Mess- und Regelungstechnik									
Z28				265.000,00	EURO					
Z29			1		EURO					
Z30	Summe Investitionskosten									
Z31		Investition		265.000,00	EURO / Jahr					
Z32		Zinssatz	7	7,00	%					
Z33		Nutzungsdauer	10	10,00	Jahre			Betrachtung Zeitraum 10 J., incl. Preissteigerung		
Z34		Annuitaet		37.730,00	EURO					
Z35	Kapitalgebundene Kosten p.a.									
Z36				37.730,00	EURO / Jahr			377.300,00		EURO
Z37										10 Jahre
Z38	O₂ Netz Kosten Verbrauch									
Z39			50	EUR/1000m ³ O ₂	0,00	EURO / Jahr			0,00	
Z40		Zinssatz Preissteigerung	3	%						
Z41		Nutzungsdauer	10	Jahre					0,00	
Z42	Strom Kosten Ausgaben p.a.									
Z43				16.756,25	EURO / Jahr			167.562,50		EURO
Z44										
Z45		Zinssatz Preissteigerung	3	%						
Z46		Nutzungsdauer	10	Jahre					192.092,00	
Z47	Wartungskosten p.a.									
Z48				2.880,00	EURO / Jahr			28.800,00		EURO
Z49		spez. Wartungskosten 3 Pfannenfeuer		0,0004	EURO/kWh					
Z50		Zinssatz Preissteigerung	3	%						
Z51		Nutzungsdauer	10	Jahre					33.016,00	
Z52	Weitere Kosten p.a. für									
Z53		Sonstige Kosten, Prüfung, Abnahme p.a.	1000		1.000,00	EURO / Jahr				
Z54		Kosten für Versicherung % der Investition p.a.	0,005		1.325,00	EURO / Jahr				
Z55				Summe	2.325,00	EURO / Jahr			23.250,00	
Z56		Zinssatz Preissteigerung	3	%						
Z57		Nutzungsdauer	10	Jahre					26.654,00	
Z58										
Z59		Summe Kosten p.a.		21.961,25	EURO / Jahr			251.762,00		EURO
Z60		Kapitalgebundene Kosten p.a.		37.730,00	EURO / Jahr			377.300,00		EURO
Z61										
Z62	Ausgaben p.a									
Z63		Summe		59.691,00	EURO / Jahr			629.062,00		EURO
Z64	Einnahmen p.a.									
Z65		Ersparnis		87.230,00	EURO / Jahr			1.097.170,00		EURO
Z66		Gas industrie		0,01525	EURO/kWh Erdgas					
Z67										
Z68		Zinssatz Preissteigerung	5	%						
Z69		Nutzungsdauer	10	Jahre						
Z70										
Z71										
Z72	JAHRESUEBERSCHUSS p.a.									
Z73				27.539,00	EURO / Jahr			468.108,00		EURO
Z74	AMORTISATIONSDAUER									
Z75				4,90	Jahre					

Auf dem Werksgelände TKN liegt ein Anschluss an eine Ringleitung für technischen Sauerstoff vor. TKN ist Großabnehmer und hat bestimmte Abnahmemengen vertraglich garantiert zu übernehmen.

Um eine vergleichbare Gasmischung mit Luft und Reingasen z.B. 99,5 % technischem Sauerstoff mit ähnlichen Randbedingungen Druck 1,03 bar absolut und einem Volumenstrom entsprechend der Mindestluftmenge und Luftverhältnis λ (siehe auch Tabelle 2 Technische Daten für ein Pfannenfeuer 2 MW) herzustellen, sind entsprechende Anlagenkonzeptionen und Komponenten notwendig. Diese sind z.B. Gebläse oder Verdichter, Gasregelstrecken, Messtechnik, Gemischregelungsarmaturen oder Überwachungseinheiten. Ein typischer Komponentenaufbau für die Gasregelstrecke reinen Sauerstoffs besteht aus folgenden Bauteilen: Druckminderer, Gasfilter, Rückflussverhinderer, Gas Magnetventilen (evt. Min- und Maxstrom Begrenzung), Druckanzeigen, Temperaturanzeigen, Druckwächter, Druckschalter und einer Gasmengenmessung. Anpassungen an jeden einzelnen Brennern sind notwendig. Es muss konstruktiv ein Mischungsbereich z.B. ein definierter Rohrabschnitt zur gleichmäßigen Verbrennungsluftmischung von der Luft aus der Halle und dem reinen Sauerstoff eingeplant werden. Hier ist zusätzlich gegebenenfalls eine Gemischregelung und Überwachung zu berücksichtigen.

In Abbildung 18 sind die Details erläutert. Für den Verfahrensvergleich wird vorausgesetzt, dass beide Systemlösungen zu den Erdgaseinsparungen von 40 % und somit zu gleichen Einnahmen führen. Auch eine Betrachtungsweise auf den Zeitraum von 10 Jahren ist dokumentiert.

Die Wartungskosten für ein Netz mit technischem Sauerstoff sind höher, da verschärfte Vorschriften der Bauberufsgenossenschaft gelten (Kennzeichnung der Armaturen und Leitungen, Sicherheitsketten und Abschaltungen in Regelungskonzepten).

Die Investitionskosten der Anlagentechnik, Umbauten sind für jedes Feuer einzeln autark vorzunehmen, fallen in Relation zum Membrankonzept geringer aus. Ein höherer Kostenfaktor ist für Abnahmen und wiederkehrende Kontrolluntersuchungen anzusetzen.

Bestimmender Faktor sind die O₂-Bereitstellungskosten im Netz; diese sind bei dem für TKN gültigen geringen Preisniveau (gilt auch für Strom und Gas) als sehr günstig zu bewerten.

Im Rahmen der Einnahmen und Ausgabegegenüberstellung ist ein jährlicher Überschuss von 27.482,00 € zu realisieren. Unter den getroffenen Annahmen ist die Amortisation schon nach 3,8 Jahren zu realisieren.

Abbildung 18

Wirtschaftlichkeit O₂
Netz TKN

Z1	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG										
Z2	O₂ Netz TKN		Auslegung 2 Min., 1 Max.								
Z3											
Z4	Versorgung von 3 Pfannenfeuer										
Z5											
Z6	Pfannenfeuer Min	Leistung	540	kW		Ersparnis Erdgas		360,0	kW		
Z7	Pfannenfeuer Max	Leistung	1200	kW				800,0	kW		
Z8	Anzahl	3						5.720.000,0	kWh/Jahr		
Z9			Min Betrieb [h]	6000	1750			572.000,0	m ³ Erdgas/ Jahr		
Z10	Jahresbetriebsstunden :	7750	h					0,40	Erdgasersparnis		
Z11	Gesamtleistung (kW) :	2	Pf.-F.	1.080,00	kW						
Z12	Gesamtleistung (kW) :	1	Pf.-F.	1.200,00	kW						
Z13	Eigenbedarf :			10,00	kW			14.300.000,00	kWh/Jahr	Erdgas / a vorher	
Z14	Nettoleistung :				kW			1.430.000,00	m ³ Erdgas/ Jahr		
Z15											
Z16	Leistung Gesamtmenge erdgas	Max	8.580.000,0	kWh		Erdgaskosten im Jahr	130.845,00	EURO / Jahr			
Z17			858.000,0	m ³ Erdgas/ Jahr		3 Pf.-F.					
Z18											
Z19	benötigte Verbrennungsluft 21 % O ₂	1,05	10	9.009.000,0	m ³ Luft / Jahr						
Z20	benötigte Verbrennungsluft mit	0,25		7.567.560,0	m ³ Luft / Jahr						
Z21	Mischung von Luft mit 21 % O ₂ und 79% N ₂			7.184.392,4	m ³ Luft / Jahr						
Z22	Sauerstoff Netz 99 % O ₂			383.167,6	m ³ O ₂ / Jahr						
Z23											
Z24	Kosten										
Z25	Investition										
Z26	Anlagenkomponenten, Regelung u. Messtechnik										
Z27	Montage										
Z28	Sonstiges, Abnahme										
Z29	3 Brenner										
Z30	Summe Investitionskosten										
Z31	Investition										
Z32	Zinssatz										
Z33	Nutzungsdauer										
Z34	Annuität										
Z35	Kapitalgebundene Kosten p.a.										
Z36											
Z37	O₂ Netz Kosten Verbrauch										
Z38	Zinssatz Preissteigerung										
Z39	Nutzungsdauer										
Z40											
Z41	Strom Kosten Ausgaben p.a.										
Z42	Strom industrie										
Z43	3,3 ct / kWh bis 7,96 ct / kWh										
Z44	Zinssatz Preissteigerung										
Z45	Nutzungsdauer										
Z46											
Z47	Wartungskosten p.a.										
Z48	spez. Wartungskosten, 3 Pf.-F., incl. Wartung O ₂ netz										
Z49	Zinssatz Preissteigerung										
Z50	Nutzungsdauer										
Z51											
Z52	Weitere Kosten p.a. für										
Z53	Sonstige Kosten, Prüfung, Abnahme p.a.										
Z54	Kosten für Versicherung % der Investition p.a.										
Z55	Summe										
Z56	Zinssatz Preissteigerung										
Z57	Nutzungsdauer										
Z58											
Z59	Summe Kosten p.a.										
Z60	Kapitalgebundene Kosten p.a.										
Z61											
Z62	Ausgaben p.a										
Z63											
Z64	Einnahmen p.a.										
Z65	Ersparnis										
Z66	Gas industrie										
Z67	1,525 ct / kWh										
Z68	Zinssatz Preissteigerung										
Z69	Nutzungsdauer										
Z70											
Z71											
Z72	JAHRESUEBERSCHUSS p.a.										
Z73											
Z74	AMORTISATIONSDAUER										
Z75											

Das Konzept zur Bereitstellung sauerstoffangereicherter Luft liegt in einem Amortisationszeitraum unter 5 Jahren. Die Anfangsinvestitionen sind jedoch höher. Hier ist wichtig zu benennen, dass die Technologie am Anfang steht und Potenziale für kostengünstigere Produktions- und Herstellungsverfahren der eingesetzten Module noch möglich sind. Die Kosten der Membranmodule nehmen in den Kalkulationen den größten Teil in Anspruch und sind daher in zukünftigen Planungen zu senken.

TKN überprüft derzeit die Konzeption für die Pfannenfeuerumrüstung auf Verfahren mit angereicherter Luft. Nach ersten Informationen sind die Abnahmeverpflichtungen, die das Unternehmen durch Verträge eingegangen hat, ausschlaggebend dafür, dass die Version mit der Bereitstellung von technischem Sauerstoff in Kombination mit einem Anlagenumbau für angereicherte Luft favorisiert wird.

6.7 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Bereits im Juni 2002 ist ein Verfahrenspatent beim Deutschen Patentamt eingereicht worden und nachfolgend wurde auch ein PCT Patentverfahren eingeleitet. Die Patentsituation zu dem Verfahrenspatent ist derzeit noch nicht abschließend geklärt, daher wurden Veröffentlichungen und wissenschaftliche Berichte zurückhaltend verfasst.

Bei Beginn des Projektes zeigten die ersten Erfahrungen zum Betriebs- und Regelverhalten der Pilotanlage sehr positive Versuchsergebnisse, so dass zielgerichtet eine Strategie zur aktiven Öffentlichkeitsarbeit entwickelt wurde. So wurde das Projekt, der Anlagenaufbau und die Versuchsdurchführung verschiedenen potenziellen Anwendern vorgestellt.

Das positive Interesse zur neuen Technologie hat die Projektbeteiligten bestärkt, auf Fachveranstaltungen, die Erfahrungen, Teilergebnisse und Projektinformationen vorzustellen; beispielsweise durch Vorträge auf Fachausschusssitzungen für Leichtmetallguss des Verein Deutscher Giessereifachleute e.V. (Nov. 04, Düsseldorf). Anwender aus dem Bereich der Aluminiumherstellung, der Zementindustrie, Keramikherstellern, Ziegelherstellern und Unternehmen aus dem Bereich der Glasindustrie sind über die möglichen Erdgaseinsparpotenziale informiert worden. Es besteht aufgrund der aktuellen Energiepreise am Weltmarkt, die Rohölpreise haben das Niveau von über 70 \$/Barrel erreicht, gesteigertes Interesse an neuen Verfahren.

Zusätzlich wurde ein Messeauftritt auf der Hannover Messe 2005 (Halle 2) konzeptionell vorbereitet, koordiniert und erfolgreich durchgeführt. Im Rahmen der Fachausstellung der HMI research & technology, gateway for innovations

konnte auf dem Gemeinschaftsstand der Fraunhofer Venture Gruppe AIROX, das spin off des Fraunhofer Institut UMSICHT, das von der DBU-geförderte Projekt vorstellen. Im Rahmen einer organisierten Forumsveranstaltung wurde das Projekt dem interessierten Fachpublikum präsentiert.

Des Weiteren wurde das DBU Projekt und die Verfahrensentwicklung zur Sauerstoffanreicherung als Innovation für industrielle Wärmeanwendungen als Referenz des Geschäftsfeldes Energietechnik im Jahresbericht 2004 des Institutes UMSICHT vorgestellt und veröffentlicht.

Im Internet sind Informationen zur Thematik Sauerstoffanreicherung und zum Projekt auf den Seiten der Firma AIROX verfügbar (www.airox.de).

7 Fazit

Wärmeprozesse im Industriesektor machen einen hohen Anteil am Energieverbrauch aus. Im Rahmen des geförderten Projektes konnte an dem konkreten Beispiel am Standort TKN der spezifische Energiebedarf der Pfannenfeuer deutlich gesenkt werden.

Ein wichtiger Bestandteil des geförderten Projektes sind die Erfahrungen, die im Rahmen des Dauerbetriebes der Pilotanreicherungsanlage gemacht worden sind. Der Sauerstoffgehalt und die Volumenströme können gut regelbar eingestellt werden. Es wurden keine größeren Ausfälle verzeichnet. Das Verfahren ist unter energetischen Gesichtspunkten optimiert worden und es wird ein Energiebedarf von ca. 0,065 kWh/Nm³ angereicherter Luft (Permeat) mit einem O₂-Gehalt von 28 % benötigt (Auslegungspunkt der Anlage 550 Nm³/h).

Diese sehr positiven Erfahrungen zeigen, dass die Technik der Sauerstoffanreicherung basierend auf innovativer Membrantrenntechnik alltagstauglich einzusetzen ist. Das Trennverhalten der verwendeten Membran und die erreichbare Qualität der angereicherten Luft blieben über die Zeit konstant.

Die Vorteile der Einspartechnologie durch den Einsatz von sauerstoffangereicherter Luft bei gleichzeitiger Reduzierung der Inertgasvolumenstromanteile an Stickstoff für industrielle Wärmeanwendungen sind:

- Reduzierung des Erdgasverbrauches und somit die Realisierung eines Energieeinsparpotenzials von 40 %. Zusätzlich ergeben sich verkürzte Aufheizphasen für den Max-Betrieb, die eine um ca. 1/3 schnellere gleichmäßige Erwärmung auf geforderte Solltemperaturen ermöglichen.
- Treibhausgasemissionen durch reduzierte CO₂-Mengen werden infolge der Leistungsreduzierungen bei gleichzeitig erhöhter Wärmeübertragung aufgrund von Strahlungswärme vermindert.
- Die Verfahrenstechnik wurde optimiert. Durch die Detailuntersuchungen zum Einfluss der Strömungsumlenkungen (Konstruktive Gestaltung, Materialauswahl hochwarmfestes Metall oder Keramik) konnten zielgerichtet Rezirkulationszonen für das Abgas eingestellt werden. Flammenform und Geometrie wurden optimal angepasst, so dass eine homogen gut durchmischte stabile Flamme entsteht. Verbesserte Verbrennungsverläufe, Flammenstabilisierungen und Abgasrezirkulationszonen am vorhandenen Beheizungssystem konnten eingestellt und deutlich höhere Flammentemperaturen erzielt werden. Mit höheren Flammentemperaturen steigt die Wärmeübertragung über den Strahlungsanteil der Flamme. Dieser Effekt wird genutzt, um die Ausmauerung (Feuerfestmaterial) der Gießpfanne mit einer optimal angepassten Flammgeometrie gleichmäßig auf geforderte Temperaturniveaus aufzuwärmen. Die Schadstoffemissionen sind dabei im Rahmen der gesetzlichen Vorschriften unterhalb der Grenzwerte eingestellt worden.
- Eine verbesserte Wirtschaftlichkeit des Betriebes ist durch die Erdgaseinsparung gegeben. Für den Anlagenbetreiber TKN sind weitere Optimierungen aufgrund der Untersuchungsergebnisse möglich. Zu nennen ist hier die Entwicklung eines optimalen Pfannenmanagements, welches unter der Berücksichtigung der realen Verweilzeiten der Gießpfannen im Produktionsprozess und der Temperaturen der Gießpfannen ermöglicht, die Reihenfolge und Vorhaltung (Pfannenanzahl) des Pfannenkreislaufes von derzeit 15 Gießpfannen zielgerichtet zu koordinieren. Derzeit gibt es in der Tendenz eher Überkapazitäten, die am Pfannenplatz vorgehalten werden, so dass über längere Zeiträume, Pfannen im Min-Betrieb beheizt werden (Warteschleife).

TKN überprüft derzeit basierend auf den realisierten Auslegungsgrundlagen, die im Rahmen des Projektes entwickelt wurden, eine Umrüstung der weiteren Pfannenfeuer auf einen Betrieb mit angereicherter Luft. Der Wirtschaftlichkeitsvergleich der Konzeption mit Membrantrennverfahren hat

gezeigt, dass wirtschaftlich interessante Amortisationszeiten unter 5 Jahren möglich sind. Die Anfangsinvestitionen sind jedoch höher. Hier ist wichtig zu benennen, dass die Technologie am Anfang steht und Potenziale für kostengünstigere Produktions- und Herstellungsverfahren der eingesetzten Module noch möglich sind. Die Kosten für die Membranmodule machen in den Kalkulationen den größten Anteil aus und sind daher in zukünftigen Planungen zu senken.

Im Vergleich dazu ist speziell an dem Standort in Bochum die Kombination der Anreicherung von Luft mit technischem reinem Sauerstoff (99 % O₂) aufgrund der firmeninternen Kostenstrukturen eine mögliche Alternative und mit einer kürzeren Amortisationszeit verbunden (3,8 Jahre). Um eine vergleichbare Gasmischung mit Luft und technischem Sauerstoff, mit ähnlichen Randbedingungen herzustellen, sind umfangreiche Umbauten an den Brennern (Gemischregelungsbaugruppen, Mess- und Regelungstechnik) notwendig, die jedoch vom Investitionsvolumen geringer ausfallen.

Grundsätzlich eignet sich das Verfahren der Sauerstoffanreicherung von Verbrennungsluft mittels innovativer Membrantechnik zur Erzeugung höherer Flammentemperaturen für die Beheizung sehr unterschiedlicher Anlagen. Auch kann diese sauerstoffangereicherte Luft in vielen anderen sehr unterschiedlichen Prozessen (Klärwerken, Schmelzöfen der Glas- oder Aluminiumindustrie) genutzt werden und dabei hohe Energiemengen einsparen. Eine quantitative Abschätzung muss für jeden Prozess und gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Standortfaktoren getrennt geführt werden.

Durch die Entwicklung und Optimierung von Einspartechnologien für industrielle Wärmeanwendungen unter Einsatz von sauerstoffangereicherter Luft konnten resultierend deutliche Wirkungsgradverbesserungen für konventionelle Anlagenkonzeptionen erzielt werden.

Der optimale Einsatz von Ressourcen, die Steigerung der Brennstoffeffizienz und geringere Emissionen sind ein entscheidender Beitrag zur Schonung der Umwelt.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Literatur

- ACMK_01 8. Aachener Membran Kolloquium, 27.-29. März 2001 – Aachen, Verlag Mainz, 2001
- ASUE_01 ASUE Publikation, Zuluftfiltration, 11 11 91, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 1991
- ASUE_03 ASUE Publikation, Gasinstallation, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 2003
- BAK_04 Baker, R. W.
Membrane Technology and Applications, 2. ed., ISBN 0-470-85445-6, Wiley, 2004
- BAEHR_03 Baehr, H. D.
Thermodynamik - Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technischen Anwendungen, Springer-Verlag, 2003
- BEN_04 Bender, W.
Wärmerückgewinnung bei Hochtemperaturprozessen, BFI, Düsseldorf, bine Projekt info 03/04
- BEN_02 Bender, W.
Effiziente Prozessgasnutzung, BFI, Düsseldorf, bine Projekt info 05/02
- BIS_02 Bisio, G., Bosio, A., Rubatto, G.
Thermodynamics applied to oxygen enrichment of combustion air, Energy Conversion and Management 43 (2002) 2589–2600
- BUD_94 N.N.
Buderus Handbuch der Heizungstechnik, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 33. Auflage, 1994
- DOU_01 Douglas, M. A.
Abstract, oxy fuel combustion, 2001

- DUB_95 Beitz, W.; Küttner, K.-H.
Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag,
Berlin, 18. Auflage, 1995
- DVGW.G260 Technische Regeln DVGW Arbeitsblatt G 260 Gasbeschaffenheit,
WVGW Verlag, Bonn, 2000
- E-REPORT_03 Krause, H.; Krein, St.
Erdgasreport 01 / 03, Verbundnetz AG, www.vng.de
- HER_00 Herr, H.
Tabellenbuch Wärme Kälte Klima, Europa Lehrmittel
Verlag, Haan-Gruiten, 1 Auflage, 2000
- HIE_02 Hiemann, A
Keramik, Rekuperatorbrenner,
Schunk Keramik GmbH, Willich, 2003
- HIE_03 Hiemann, A
Hochtemperaturtechnik, SIC in der Industrie,
Schunk Keramik GmbH, Willich, 2003
- JOE_04 Jochem, Schön, Angerer, u. a.
Werkstoffeffizienz- Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung
energieintensiver Grundstoffe, Bericht BWA, 0327313A, 2004
- KLI_00 Klima, R., Radgen, P.
Industrielle Wärmeprozesse, BFI, Düsseldorf, FHG ISE,
bine Projekt info 11/00
- KOE_04 Köster, Scherello, Flamme, Kremer,
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung der
elektrischen Zündung von erdgasbetriebenen Industriebrennern,
GWI, Bericht Essen, 2004
- LIN_04 N.N.
Linde Wissenschaftliche Berichte,
onsite versorgung mit technischen Gasen, 2004
- MAI_03 Maier, H.D.
Leitfaden technische Keramik,
IKKM Aachen, 2003

- MEY_00 Meyer, F.
Energieeffiziente Industrieöfen,
bine Projekt info 3/00
- PRE_05 Preußer, A.
Gastechnik Live, Verbundnetz AG, 05/ 2005, www.vng.de
- REC_97 Recknagel, Sprenger, Schramek
Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik; R. Oldenbourg Verlag,
München Wien, 68. Auflage, 1997
- RHI_04 N.N.
Feuerfest Grundlagen, Begriffsbestimmungen,
Präsentation RHI Refractories, 2004
- STO_04 Storm, C.
Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung der
elektrischen Zündung von erdgasbetriebenen Industriebrennern,
GWI, Bericht Essen, 2004
- U_B22 Oberhausener Grubengastage 2000, UMSICHT Schriftenreihe Band 22,
Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2000
- U_B37 Oberhausener Grubengastage 2001, UMSICHT Schriftenreihe Band 37,
Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2002
- WUT_04 Wuthnow, H.
Neue Wärmedämmstoffe für Hochtemperaturprozesse, DIFK, Bonn, bine
Projekt info 09/04

9 Anhang

9.1 Abbildungen Stahlwerk TKN, Pfannenfeuer

Abbildung 19

Pfannenfeuer 1



Abbildung 20

Pf.-Feuer 1 u. 2 nach
Optimierung, P = 1,2
MW/Feuer



Abbildung 21

Ansicht Produktionshalle
TKN



Abbildung 22

Pf.-Feuer 2 vor
Optimierung,
Flammengkegel
Mischungszone



Abbildung 23

Pf.-Feuer 1,
Brenneröffnung

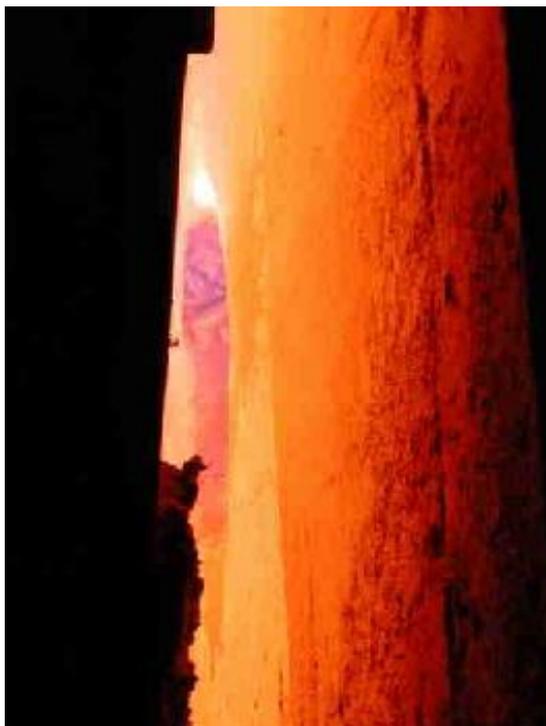


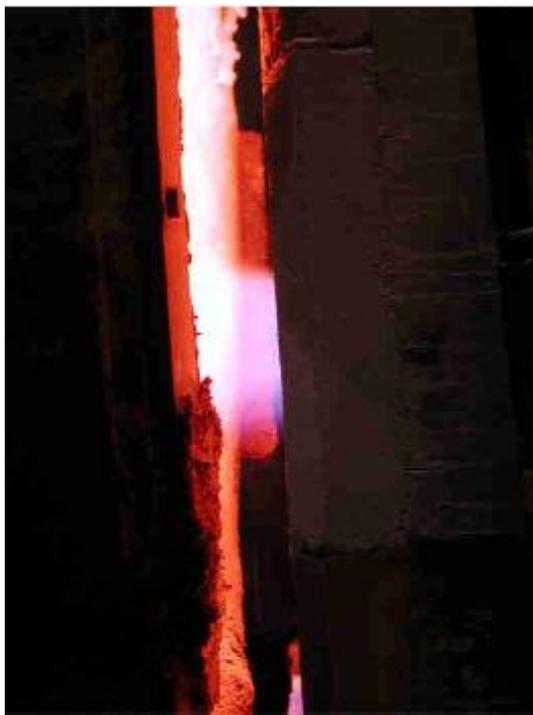
Abbildung 24

Ansicht Gießpfanne, 80 t



Abbildung 25

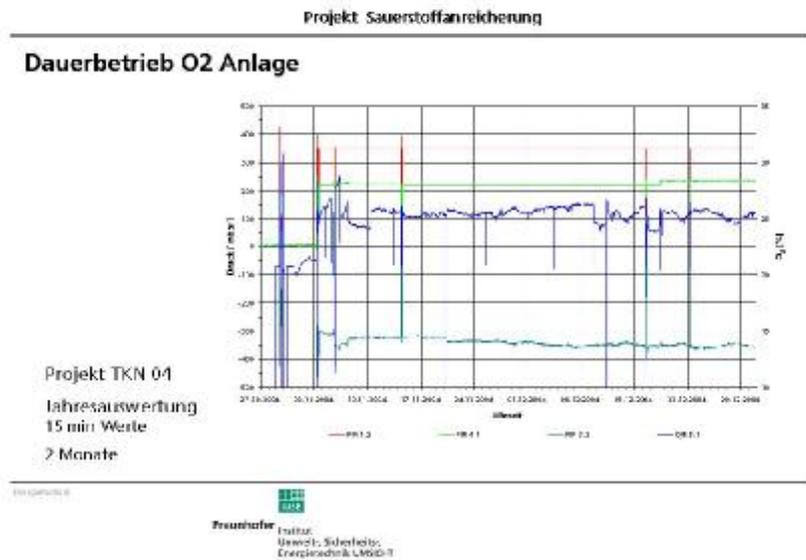
Pf.-F. 1, optimierte
parallele Flammenform



9.2 Ergebnisse Dauerbetrieb

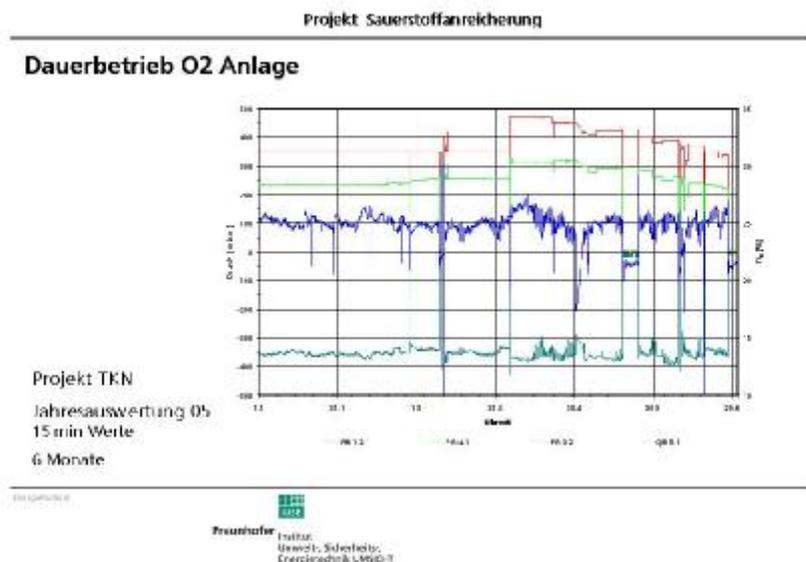
Grafik 1

Dauerbetrieb Pilotanlage
04



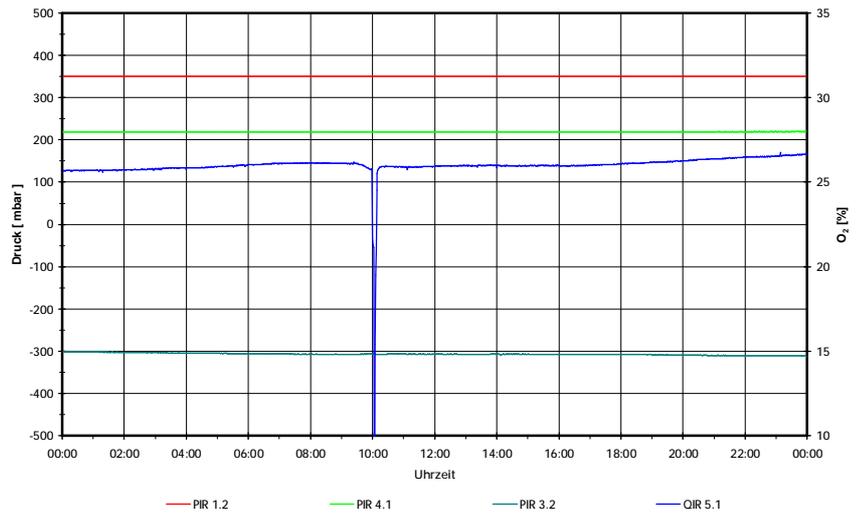
Grafik 2

Dauerbetrieb Pilotanlage
05



Grafik 3

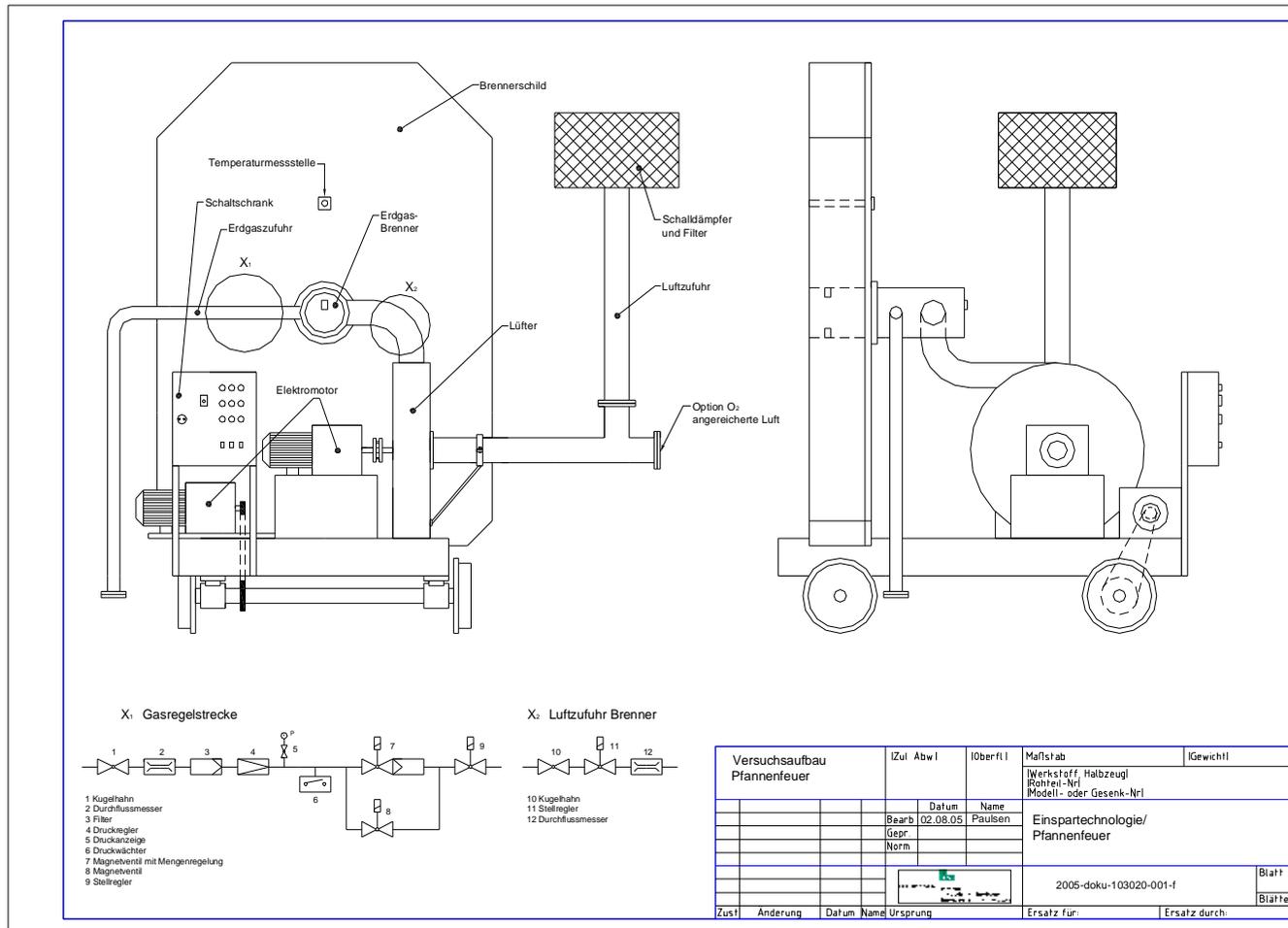
Tagesdokumentation
04.11.04 Pilotanlage,
15 Sek. Werte



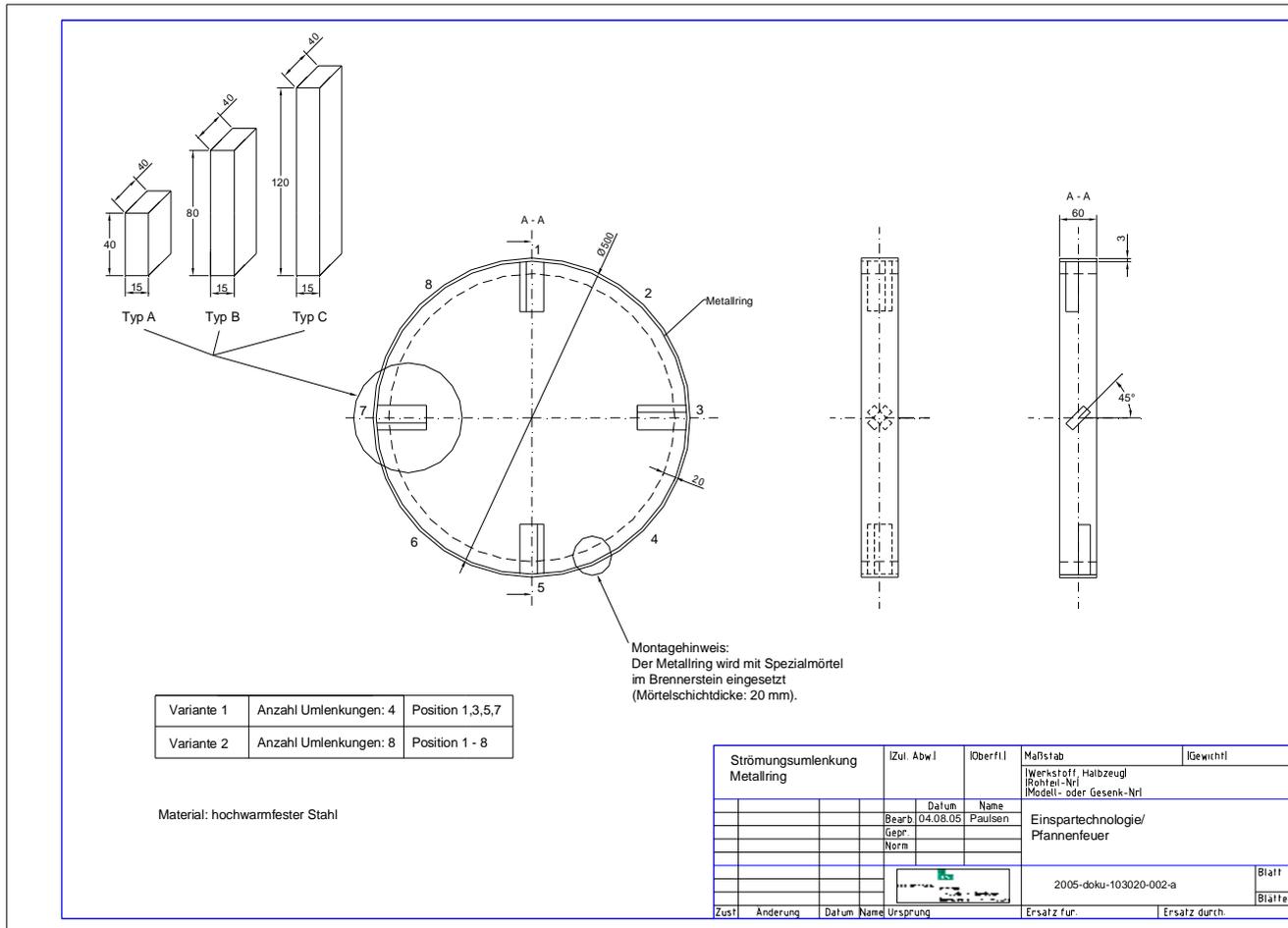
9.3 Brenner, Strömungsumlenkung, Option Optimierung

Zeichnung 1 Versuchsaufbau Pfannenfeuer	59
Zeichnung 2 Strömungsumlenkung, Metall	60
Zeichnung 3 Strömungsumlenkung Keramik	61
Zeichnung 4 Wärmetauscher Brennerschild, Option Optimierung	62
Zeichnung 5 Wärmetauscher Variante B, Brennerschild, Option Optimierung	63
Zeichnung 6 Messrohr Abgas	64

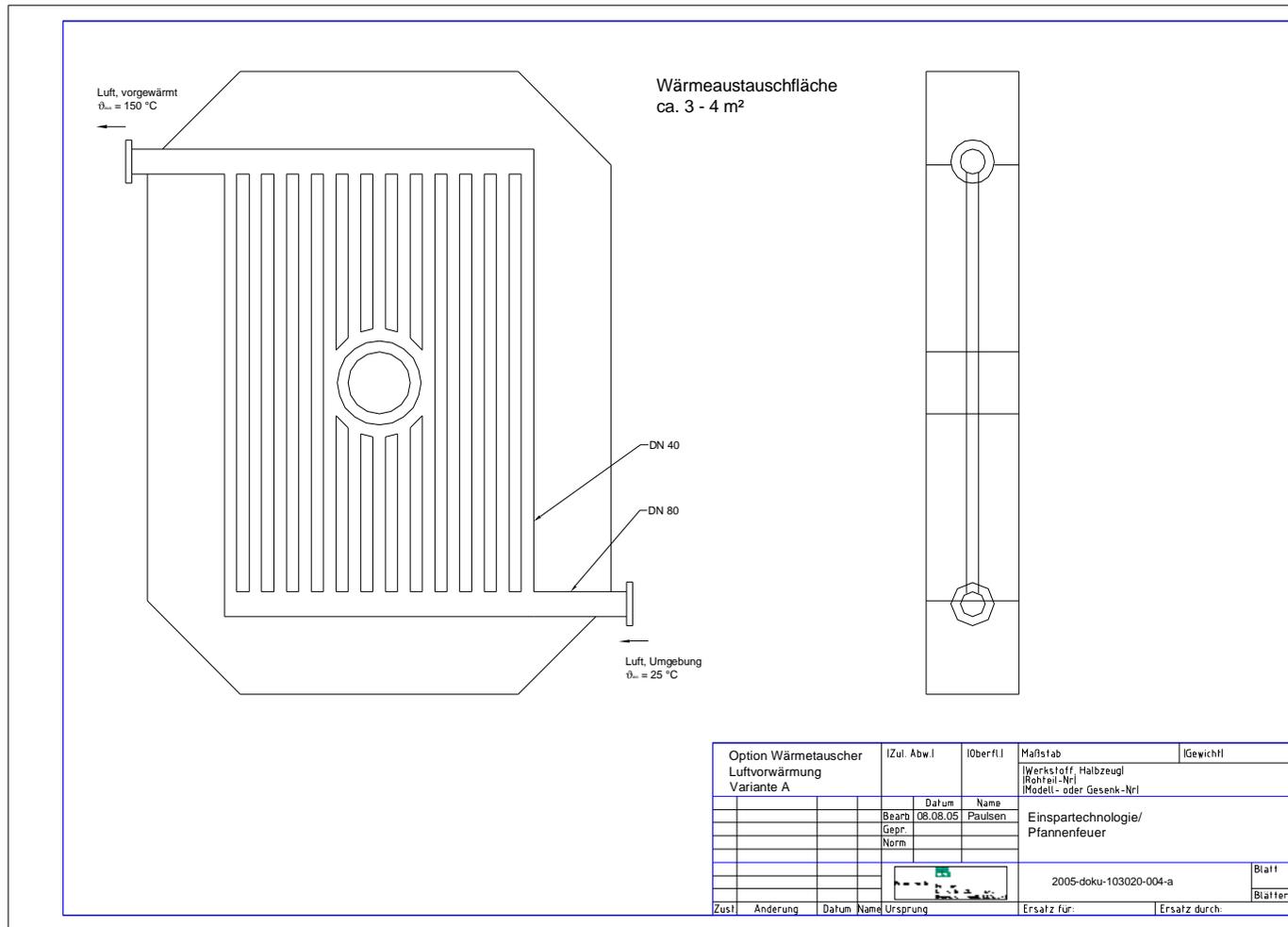
Zeichnung 1 Versuchsaufbau Pfannenfeuer



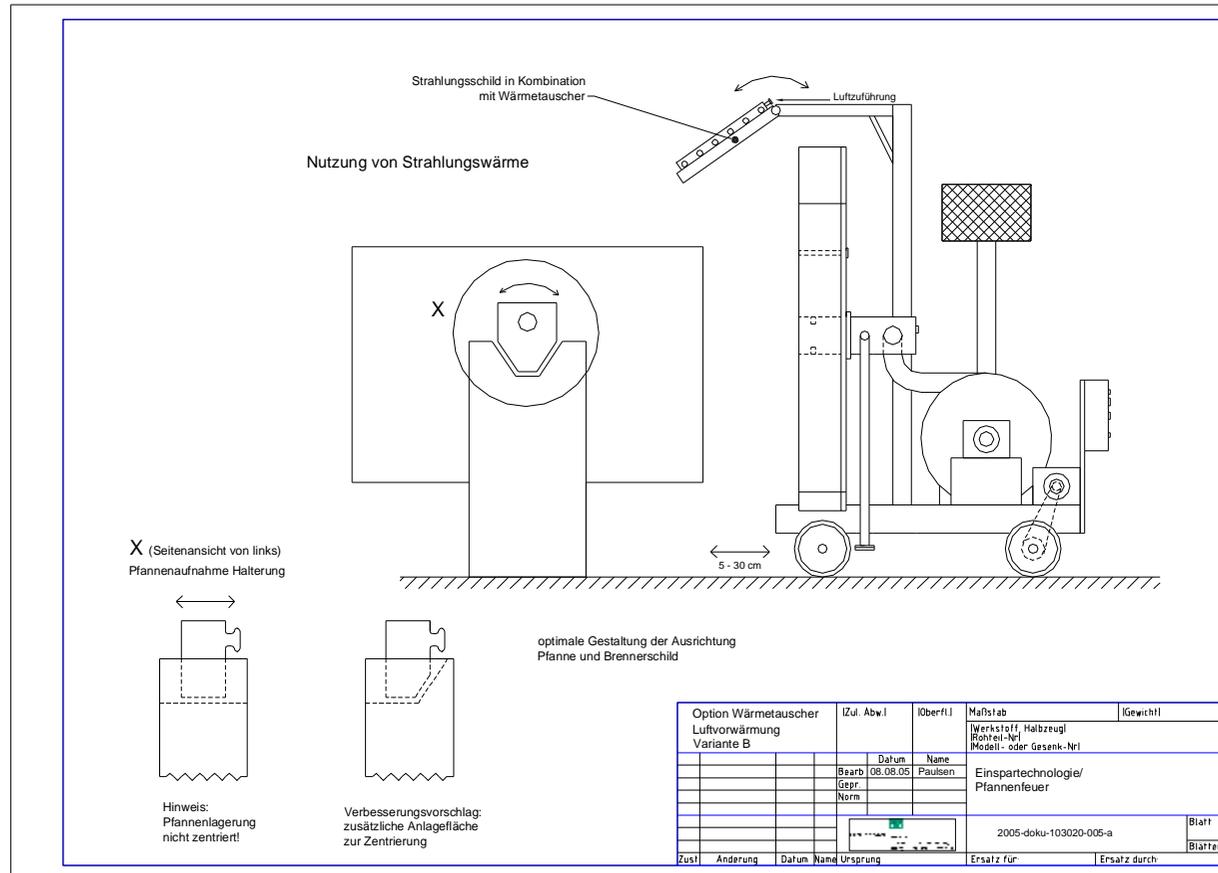
Zeichnung 2 Strömungsumlenkung, Metall



Zeichnung 4 Wärmetauscher Brennerschild, Option Optimierung



Zeichnung 5 Wärmetauscher Variante B, Brennerschild, Option Optimierung



Zeichnung 6 Messrohr Abgas

