



Schlussbericht

Schadstoffminimierte Verbrennung für flüssige Brennstoffe unter Zugrundelegung eines vollautomatischen Brennerbetriebes

Erstellt am Institut für energieoptimierte Systeme (EOS)
Labor für Gas- und Verbrennungstechnik

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Campus Wolfenbüttel
Fakultät Versorgungstechnik

Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Benno Lendt
Dr. rer. nat. Thomas Potempa
Dipl.-Ing. David Wienecke
Tommy Haufe (B.Eng.)
Dipl.-Ing. Gunnar Eikenloff (M.Eng.)
Jan Eisner (B.Eng.)

Wolfenbüttel, am 30.06.2015

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03FH003PX2 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
1 Allgemeines zum Projekt	4
1.1 Projektdaten.....	4
1.2 Aufgabenstellung	5
1.3 Voraussetzungen	7
1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens	8
1.4.1 Aufteilung der Arbeitspakete	8
1.4.1.1 Erstellung eines Lastenheftes.....	8
1.4.1.2 Grobauslegung des Steuerungskonzepts der Versuchsanlage.....	8
1.4.1.3 Modifikation der Versuchsanlage.....	9
1.4.1.4 Untersuchung zum Regelverhalten bei wechselnden Lasten im Regulärbetrieb	9
1.4.1.5 Untersuchung zum Regelverhalten im An- und Abfahrbetrieb.....	10
1.4.1.6 Validierung des Steuerungskonzepts im Dauerbetrieb.....	10
1.4.1.7 Anpassung des Simulationsmodells: Netzgenerierung und Modellbildung, Stickoxidemissionen	11
1.4.1.8 Optimierung der Gestaltung und Positionierung des Sekundärölverdampfers.....	12
1.4.1.9 Übertragung: Oberflächenbrenner als Primärbrenner; Modifikation des Versuchsaufbaus	12
1.4.1.10 Messung der Schadstoffemissionen: Parametervariationen	12
1.4.1.11 Validierung des Emissionsverhaltens	13
1.4.2 Zeitlicher Ablauf des Vorhabens.....	13
1.5 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn	14
1.6 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden	22
1.7 Verwendete Fachliteratur	23
1.8 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	26
2 Erzielte Ergebnisse.....	27
2.1 Untersuchungen am modifizierten Blaubrenner.....	27
2.1.1 Bauliche Maßnahmen	28
2.1.1.1 Integration eines Schrittmotors	28
2.1.1.2 Austausch des Flammenwächters.....	28
2.1.1.3 Integration eines regelbaren Ventils für den Sekundärkreis des Brennstoffes	29
2.1.1.4 Einbau eines Durchflussmessers	29
2.1.2 Begleitende Simulationen.....	29
2.1.2.1 Kalt durchströmte Brennkammer	29
2.1.2.2 Auswahl des Solvers und initiale Simulation	31
2.1.2.3 Vereinfachungen im Simulationsmodell	32
2.1.2.4 Optimierung des Rezirkulationsrohres.....	33

2.1.3	Ermittlung der optimalen Brennerkonfiguration.....	35
2.1.3.1	Messung des Druckverlustes über der Verdampferspirale.....	36
2.1.3.2	Emissionsmessungen bei verschiedenen Brennerkonfigurationen	38
2.2	Automatisierung des Brennerbetriebes (Blaubrenner).....	40
2.2.1	Automatisierung des Schrittmotors für den Rezirkulationsspalt	41
2.2.2	Automatisierung des Nadelventils im Sekundärkreis	44
2.2.3	Automatisierung des Gebläses für die Verbrennungsluft	46
2.2.4	Steuerungs- und Regelungskonzept des Gesamtsystems	47
2.3	Lastganguntersuchungen (Blaubrenner)	49
2.3.1	Tageslastgänge.....	49
2.3.2	Emissionsverhalten im Lastgangbetrieb	50
2.4	Modifikation eines Oberflächenbrenners	57
2.4.1	Bauliche Maßnahmen	59
2.4.2	Optimierung der Mischung im Brennerrohr des Oberflächenbrenners	60
2.4.3	Verbrennungsversuche am offenen Teststand	63
2.4.3.1	Positionsermittlung & Spiralenabstand	64
2.4.3.2	Kolbenpumpe	65
2.4.3.3	Speicherprogrammierbare Steuerung.....	66
2.4.3.4	Einbettung des Oberflächenbrenners in eine Brennkammerumgebung	67
2.4.3.5	Realisierung eines autonomen Betriebes.....	69
2.4.3.6	Optimierung der Verbrennung.....	71
2.4.4	Emissionsverhalten des Oberflächenbrenners	79
3	Verwendung der Zuwendung.....	81
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	82
5	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit.....	82
6	Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen	83
7	Abbildungsverzeichnis	84
8	Tabellenverzeichnis	87

1 Allgemeines zum Projekt

1.1 Projektdaten

Programm FHprofUnt:

Forschung an Fachhochschulen mit Unternehmen

Projektträger:

Projektträgerschaft Forschung an Fachhochschulen

Projektträger Jülich

Forschungszentrum Jülich

52425 Jülich

Zuwendungsempfänger:

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften – Hochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

Förderkennzeichen:

03FH003PX2

Vorhabensbezeichnung:

Schadstoffminimierte Verbrennung für flüssige Brennstoffe unter Zugrundelegung eines vollautomatischen Brennerbetriebes

Homepage:

<http://ostfalia.de/cms/de/v/unternehmen/Forschung.html>

Projektpartner:

- Herrmann GmbH & Co. KG (Waiblingen)
- Solvis GmbH & Co. KG (Braunschweig)
- Technische Universität Braunschweig - Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (InES)

Name der antragstellenden Hochschule:

Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften – Hochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

1.2 Aufgabenstellung

Die Wärmeerzeugung zur Bereitstellung von Warm- und Heizwasser zu Nutzzwecken wird heute vielfach in Ölniedertemperatur- und -brennwertkesseln vorgenommen. Dabei erfolgt die Verbrennung des fossilen Primärenergieträgers Heizöl in einer von außen wassergekühlten Brennkammer, auf deren Stirnseite ein Gebläsebrenner positioniert ist. Solche Wärmeerzeuger werden für Feuerungswärmeleistungen bevorzugt bis 50 kW eingesetzt und sind in privaten Haushalten und Gewerbe weit verbreitet. Insbesondere vor dem Hintergrund steigender Energiepreise wird auf Seiten der Verbraucher als auch der Hersteller von Feuerungsanlagen darüber nachgedacht, den Brennstoff Heizöl durch einen nachwachsenden Brennstoff oder Mischungen aus beiden zu substituieren. Auf der anderen Seite erfordert die zunehmende Kombination konventioneller Kesseltechnik mit Systemen zur regenerativen/rationellen Energienutzung (Solarkollektoren bzw. Wärmepumpen und BHKW) zunehmende Anforderungen an die Modulationsfähigkeit von Brennersystemen. Dies ist bei Ölbrennern gegenwärtig nur sehr bedingt möglich.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes „**Stickoxidarme Verbrennung in einer neuartigen Feuerung für flüssige Brennstoffe**“ (AiF ProfUnt FKZ 1791X08) wurde von den Antragstellern eine Feuerung untersucht, bei der Verbrennung und Verdampfung des Öls (Raps- bzw. Heizöl) nicht, wie bei herkömmlichen Ölbrennern, miteinander verknüpft, sondern apparativ voneinander entkoppelt sind. Es konnte gezeigt werden, dass durch den neuartigen Aufbau des Brenners sowie die konsequente Anwendung von Primärmaßnahmen die Raten der externen Rezirkulation, welche einer Schadstoffentstehung innerhalb des Verbrennungsprozesses entgegenwirkt, erhöht und somit die Stickoxidemissionen in einem Leistungsbereich von 7 kW bis 16 kW sicher unter 50 mg/kWh gehalten werden können, was gegenüber herkömmlichen Brennern eine Verbesserung um mehr als 20% darstellt. Solche größeren Rezirkulationsraten führen bei herkömmlichen Brennern zu einer instabilen Verbrennung bis hin zum Abbruch des Verbrennungsprozesses. Gleichzeitig konnte der Nachteil herkömmlicher Brenner hinsichtlich einer stufenlosen Leistungsregulierung behoben werden.

Bei den Untersuchungen konnte jedoch festgestellt werden, dass es bislang keine Regelungs- und Steuerungsstrategie für diese Primärmaßnahmen gibt. Alle untersuchten Betriebszustände mussten von Hand eingestellt werden. Gleiches gilt für ein emissionsarmes Anfahren und Abschalten des Brenners. Die bisher in der Praxis eingesetzten Steuerungsprogramme sind für eine bedarfsabhängige Regulierung der Feuerungswärmeleistung und Steuerung der Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung nicht ausgelegt.

Um auf die zeitlichen Schwankungen im Wärmebedarf in Haushalten und Gewerbe hinsichtlich einer minimierten Stickoxidemission zu reagieren, soll im Rahmen dieses Vorhabens der bestehende Prototyp (AiF ProfUnt FKZ 1791X08) /F41/ um regelungsfähige Komponenten für die Sauerstoff- und Sekundärbrennstoffzufuhr sowie die Variation des Rezirkulationsspaltes erweitert werden.

Bei dem bisherigen Prototyp wurde in den Brennraum eines als solches konventionell ausgebildeten Blaubrenners (im Folgenden als Primärbrenner bezeichnet) ein Verdampfer für den hauptsächlich zu verbrennenden Flüssigbrennstoff – den Sekundärbrennstoff bzw. das Öl – integriert, aus dem das verdampfte Öl über eine Brennstoffzuführeinrichtung in den Brennraum austreten kann und dann dort verbrannt wird. Der Verdampfer ist in Form eines Wärmeübertragers ausgebildet: Wärme aus dem Brenn- und Abgasstrom wird über eine Wärmeübertragungsfläche an den zu verdampfenden Sekundärbrennstoff übertragen und

der Brennstoff wird dabei verdampft. Der verdampfte Flüssigbrennstoff, der den Sekundärbrennstoff darstellt, wird über Brennstoffzuführeinrichtungen über die externe Abgasrezirkulation in den Brennraum zugeführt. Der Verdampfer nimmt somit gleichzeitig auch die Funktion eines Sekundärbrenners wahr.

Um die günstigen Stickoxidemissionen zu realisieren, mussten die Leistung des Pilotbrenners, die Sauerstoffzufuhr für die Verbrennung sowie die Öffnungsweite des Rezirkulationspaltes von Hand eingestellt werden.

Nach der o.a. Modifikation des Prototyps sind diese Komponenten in das Steuer- und Regelungskonzept des Brenners einzubinden. Weiterhin ist das Steuer- und Regelungsverhalten für schwankende Wärmebedarfsanforderungen innerhalb eines speicherintegrierten Wärmeerzeugers (Bild 1) im Normalbetrieb zu evaluieren und anhand von Langzeitmessungen zu validieren. Aufbauend auf diesen Ergebnissen soll anschließend das Steuer- und Regelungskonzept für ein besonders stickoxidarmes An- und Abfahren des Brenners entwickelt und in das Steuerungsprogramm des Brenners integriert werden.

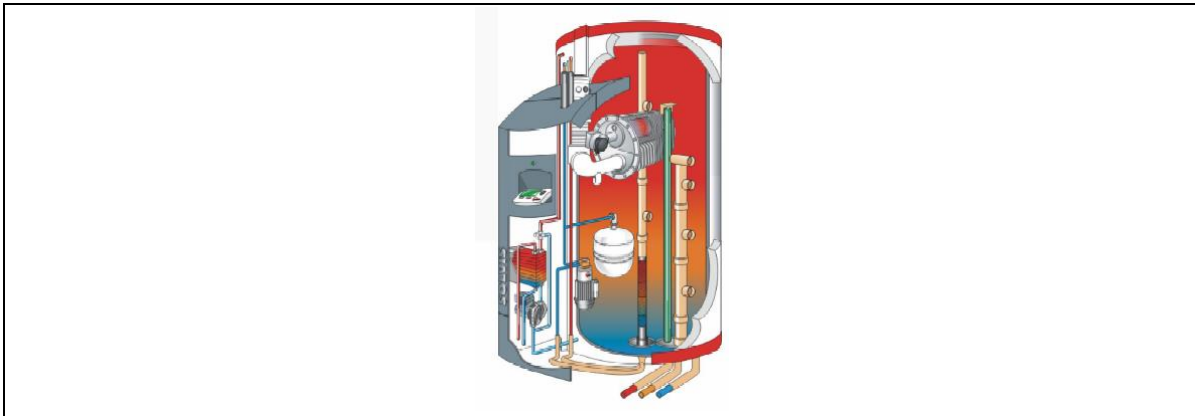


Bild 1: Schematische Darstellung eines ölgefeuerten, speicherintegrierten Wärmeerzeugers zur Bereitstellung von Warm- und Heizwasser; Quelle: SOLVIS GmbH & Co KG

Um die Übertragbarkeit und anschließende Dissemination der Ergebnisse auf abweichende Brennergeometrien (andere Hersteller, unterschiedliche Primärbrennerleistungen) sicherzustellen, soll das Stickoxidbildungsverhalten dieses neuen Brennertyps mittels Simulationsrechnungen abgebildet und der Einfluss einer Modifikation der Brennergeometrie im Hinblick auf das Regelungsverhalten vorhergesagt und im Versuch validiert werden.

Weiterhin soll das Konzept der Sekundäröleinspeisung auf eine Feuerung mit Oberflächenbrenner übertragen werden, wodurch der sich öffnenden Schere zwischen erforderlicher Brennerleistung im Neubaubereich bzw. im energetisch sanierten Gebäudebestand mit einer erhöhten Modulationsfähigkeit von Brennern für Flüssigbrennstoffe begegnet werden soll. Hiermit wird die Möglichkeit der Dosierung kleinster Brennstoffmassenströme mit den verfahrenstechnischen Vorteilen eines Flächenbrennersystems verknüpft. Diese liegen aus Sicht des Antragstellers und der beteiligten Kooperationspartner in einem geräuscharmen Betrieb, niedrigen Abgasemissionen und hoher Modulation der Feuerungsleistung bei guter Stabilität der Flamme und geringem Bedarf an elektrischer Hilfsenergie.

1.3 Voraussetzungen

Voraussetzungen an der Ostfalia

Projektleiter Prof. Dr.-Ing. Benno Lendt, Leiter des Labors für Gas- und Verbrennungstechnik am Institut EOS der Ostfalia, verfügte bei Projektbeginn über Forschungserfahrung aus dem vorhergehenden Forschungsprojekten "Stickstoffarme Verbrennung in einer neuartigen Feuerung für flüssige Brennstoffe (AiF ProfUnt FKZ 1791X08) sowie weiterer Projekte mit dem Schwerpunkt "Schadstoffminimierte Verbrennung". Eine Liste der Projekte und Publikationen findet sich im WWW unter

http://www.ostfalia.de/cms/de/v/wir_ueber_uns/Personen/_mitarbeiter_seiten/lendt.html.

Er vertritt seit seinem Eintritt in die Hochschule (1996) die Lehrgebiete:

Thermodynamik (I + II), Gastechnik (I + II), Planung und Auslegung gastechnischer Anlagen, Öffentliche Gasversorgungstechnik, Regenerative Energietechnik, Numerische Strömungssimulation

Voraussetzungen bei der Fa. Herrmann GmbH & Co. KG

Die **Firma Herrmann** wurde 1958 gegründet und nahm 1960 die eigene Produktion von Ölbrennern auf. Sie ist heute noch weltweit der einzige Brennerhersteller, der Spezial-Öl- und Gasgebläsebrenner für Fleischerei- Koch- und Räucheranlagen produziert. In Deutschland liegt ihr Marktanteil für diese Spezialbrenner bei über 90 %. 1967 erfolgte die Erweiterung der Produktion auf Kompakt-Ölbrenner für Heizungen. Produziert und vertrieben werden Ölbrenner im Leistungsbereich von 16 - 2.180 kW und Gasbrenner im Leistungsbereich von 15 - 1.200 kW. Im Werk Waiblingen werden derzeit etwa 50 Mitarbeiter beschäftigt. Die Produktionsmenge liegt bei etwa 35.000 Brennern/Jahr.

Sämtliche Brenner sind nach EN 267 geprüft und in Deutschland durch DIN CERTCO zertifiziert. Fünf Brennermodelle aus dem Herstellungsprogramm im Leistungsbereich bis 120 kW wurden nach RAL UZ-9 (Blauer Engel) geprüft und zugelassen. Alle Brenner werden in einer eigenen Forschungs- und Entwicklungsabteilung entwickelt. Durch den Einsatz modernster Entwicklungstools, wie 3D-CAD-Systemen und Rapid Prototyping Verfahren wird die Produktqualität ständig verbessert und dabei die Entwicklungszeiten erheblich verkürzt.

Voraussetzungen bei der Firma Solvis GmbH & Co. KG

Die **Firma Solvis** arbeitet seit 1994 auf dem Gebiet der Solar- und Speichertechnik und hat rund 230 Beschäftigte. Sie hat ein Patent für besonders effiziente und selbstregelnde Schichtspeichereinrichtungen zur optimierten Speicherbeladung. Mit dem SolvisMax wurde der erste Solarspeicher mit integriertem Gasbrenner im Flammenrohr mit Brennwertnutzung erfolgreich im Markt eingeführt (s. Bild 1). Dieses Produkt war ausschlaggebend für die Verleihung des Solarpreises 1998 von der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS) und der International Solar Energy Society (ISES) und für die Auszeichnung mit dem "Umweltpreis des Landes Niedersachsen 1998" an die Firma Solvis. Die Produktionsstätte der Firma Solvis entspricht als Nullemissionsfabrik hohen ökologischen Ansprüchen. Das Gebäudekonzept umfasst die vollständig regenerative Versorgung mit

Wärme und Elektrizität. Für Wohngebäude bietet Solvis heizölgefeuerte Blaubrenner (Fa. Giersch, Fa. Scheer, Fa. Herrmann), die über eine speicherintegrierte Niedertemperatur- bzw. Brennwertbrennkammer mit dem Schichtspeicher SolvisMax kombiniert werden können.

Voraussetzungen an der Technischen Universität Braunschweig - Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (InES)

Das **Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (InES)** der Technischen Universität Braunschweig beschäftigt sich vornehmlich mit der Simulation von Energiewandlungskreisläufen (stationär und instationär) einschließlich der Simulation von Dampfkraftwerken, GuD-Anlagen, Brennstoffzellen-Anlagen und Druckluftspeicherkraftwerken. Ein weiterer für das Projekt besonders relevanter Schwerpunkt ist die CFD-Simulation von Brennkammern einschließlich NO_x-Bildung, SO₂-Emissionen, Verschlackung und Verschmutzung mit einem institutseigenen Simulationsprogramm.

1.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

1.4.1 Aufteilung der Arbeitspakete

Die inhaltliche Durchführung des Vorhabens wurde in zwölf **Arbeitsschritte** gegliedert. Dargestellt ist hier die **Definition** der Arbeitsschritte aus der Vorhabenbeschreibung zur Antragstellung. Die Definition der Arbeitsschritte ist unten mit einem Hinweis „**Abweichung von der Aufgabendefinition**“ versehen, wenn sich im Verlauf des Projektes Änderungen an der Zielsetzung ergeben haben. In der Vorhabenbeschreibung wurden „**Ergebnisse**“ versprochen. Dargestellt ist durch „**Erledigt**“, wie diese versprochenen Ergebnisse im Projekt erbracht wurden.

1.4.1.1 Erstellung eines Lastenheftes

Gemeinsam mit den Kooperationspartnern wurden die regelungstechnischen und konstruktiven Randbedingungen definiert. Da die Anforderungen seitens der Kooperationspartner bezüglich Steuerung des Brennersystems bzw. Steuerung und Regelung des Gesamtsystems zur Wärme- und Warmwassererzeugung unterschiedlich sind, wurden die für beide Anforderungen zu untersuchenden Betriebszustände spezifiziert. „**Erledigt**“.

1.4.1.2 Grobauslegung des Steuerungskonzepts der Versuchsanlage

Aufbauend auf das erarbeitete Lastenheft wurde ein Konzept für die Steuerung der Versuchsanlage erarbeitet. Der Versuchsaufbau setzt dabei alle Funktionen des Lastenheftes um. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die zu untersuchenden Betriebszustände (Regulärbetrieb, Anfahrbetrieb sowie Abfahrbetrieb) gelegt. Die Anpassung der Regelung und Steuerung stellte dabei ein wesentliches Teilziel des Vorhabens dar und hatte einen maßgeblichen Anteil an der Sicherstel-

lung eines stabilen Dauerbetriebes der Versuchsanlage. Die Programmierung der Steuerelektronik hinsichtlich der notwendigen und maßgeblichen Änderungen wurde analysiert. Die neue Brennerregelung enthält eine qualitative Fehlerdiagnosemöglichkeit. „**Erledigt**“.

1.4.1.3 Modifikation der Versuchsanlage

Da aus dem Vorgängerprojekt ein funktionsfähiger Versuchsaufbau zur Verfügung stand, wurde der zuvor verwendete Blaubrenner durch ein vergleichbares Modell des Kooperationspartners Herrmann Brenner GmbH & Co KG ersetzt. Dieser Schritt war zwingend notwendig, da hierdurch die Möglichkeit eröffnet wurde, unmittelbar in das Steuerprogramm des Brenners eingreifen zu können und es im Sinne der Projektziele zu modifizieren. Die Vorbereitung für die Modifikation des konventionellen Blaubrenners - wie auch die Grundprogrammierung der Steuerungseinheit selbst - erfolgte in der Werkstatt der Herrmann Brenner GmbH & Co KG. Parallel dazu erfolgte die Beschaffung der erforderlichen Kaufteile.

Anschließend wurde das Funktionsmuster in der Hochschule Braunschweig/Wolfenbüttel zusammengebaut. Während der Inbetriebnahmephase erfolgte die Feinabstimmung der Anlagensteuerung. In ersten Versuchsreihen mit Heizöl EL wurde das einwandfreie Arbeiten der Steuerelektronik und die ordnungsgemäße Einbindung der neuen Komponenten (Sekundärbrennstoffregelung, Rezirkulationsspaltweitenregulierung) überprüft und weitere Anpassungen an die Steuerung vorgenommen. „**Erledigt**“.

1.4.1.4 Untersuchung zum Regelverhalten bei wechselnden Lasten im Regulärbetrieb

Nach erfolgreicher Modifikation und Inbetriebnahme der Versuchsanlage erfolgte die Untersuchung des Betriebsverhaltens im Regulärbetrieb. In einem ersten Schritt wurde das Regelungs- und Emissionsverhalten der Anlage bei Aufprägung von Standardlastprofilen ermittelt. Ziel dieses Projektschrittes war es, eine optimale Abstimmung von Sekundärbrennstoffzufuhr und Rezirkulationsspaltweite zu realisieren und das resultierende Kennfeld in Abstimmung mit Projektpartner Herrmann in der Brennersteuerung fest zu implementieren. Im Anschluss an die Implementierung des Kennfelds erfolgt die Vorbereitung der Integration des Brenners und damit auch der Brennersteuerung in das Gesamtsystem zur Wärmeerzeugung. Die Aufprägung der wechselnden Lasten erfolgt durch die simulierte Vorgabe von Temperaturänderungen im Warmwasserspeicher, die von der Steuerung des Gesamtsystems in wechselnde Lasten umzusetzen sind. In Abstimmung mit Fa. Solvis wurden veröffentlichte Standardlastprofile für Heizwärme- und Warmwasserbedarf verwendet. Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes waren weitere Anpassungen an der Steuerung und Regelung sowohl des Brenner als auch des Gesamtsystems erforderlich. „**Erledigt**“.

1.4.1.5 Untersuchung zum Regelverhalten im An- und Abfahrbetrieb

Schwerpunkt dieses Arbeitsschrittes war die Optimierung des Emissionsverhaltens beim An- bzw. Abfahren des Brenners. Das Anfahren des neuen Brenners setzt sich aus 4 Teilschritten zusammen:

- a) Spülen der Brennkammer mit Luft;
- b) Anfahren des Brenners mit hoher Leistung
- c) Reduzierung der Leistung mit gleichzeitiger Aktivierung des Sekundärkreises und Justierung der Rezirkulationsspaltweiten und
- d) Einstellung der angeforderten Feuerungswärmeleistung.

Im Rahmen des Brenneranfahrbetriebes wurde ermittelt, zu welchem Zeitpunkt die sekundäre Brennstoffzuführung aktiviert werden kann, ohne erhöhte, vorzugsweise jedoch deutlich verminderte Emissionswerte zu erhalten. Darüber hinaus wurden in Abhängigkeit der Feuerungswärmeleistung die zugrundeliegenden Totzeiten ermittelt und in der Regelung des Brenners hinterlegt. Gleiches gilt für die Einstellung der Rezirkulationsspaltweiten.

Das Herunterfahren erfolgt gemäß Brennerkonzeption in 2 Schritten:

- a) sukzessives Herunterfahren des Sekundärkreises bei gleichzeitiger Verringerung der Rezirkulationsspaltweite
- b) Herunterfahren des Primärbrenners

Um die Standfestigkeit des Systems zu sichern wurde ein Spülzyklus für den Sekundärkreis in den Anfahrbetrieb des Brenners integriert. Abhängig von der absolvierten Betriebsdauer seit dem letzten Spülzyklus wurde im Anfahrbetrieb die hohe Leistungsstufe des Primärbrenners länger aufrechterhalten und die Verdampferspirale des Sekundärkreises in dieser Zeitspanne automatisiert mit Luft durchspült. Die Spaltweite des Rezirkulationsspalt wurde während des Spülvorgangs etwas erhöht.

Für den sicheren Anfahrbetrieb bei einem kalten Kessel – wie zum Beispiel nach längeren Abschaltungen oder Ausfällen – wurde ein Aufheizbetrieb realisiert. In dieser Betriebsstufe wurde ebenfalls die hohe Leistungsstufe des Primärbrenners aufrechterhalten bis der Pufferspeicher eine Mindesttemperatur erreicht hatte, dann erst wurde die Leistungsstufe verringert und der Sekundärkreis angefahren. Bei Bedarf wurde die Spülung des Sekundärkreises auch während des Aufheizbetriebes durchgeführt. Die hierfür ermittelten Parameter wurden ebenfalls in der Brennersteuerung implementiert. „**Erledigt**“.

1.4.1.6 Validierung des Steuerungskonzepts im Dauerbetrieb

Der im Anschluss an die Arbeitsschritte 4 und 5 vorgesehene mindestens 4-wöchige Dauerbetrieb der Anlage konnte nicht vollständig realisiert werden, da der unbeaufsichtigte Betrieb bei Nacht nicht durchgeführt werden durfte und technische Probleme bei der Wärmeabfuhr laufende Messungen unterbrachen. Aus den beiden vorangegangenen Arbeitsschritten stand eine Regelung des Brenners und des Gesamtsystems zur Verfügung, welche ein sicheres und schadstoffoptimiertes An- und Abfahren des Brenners sowie ein optimiertes Reagieren auf unterschiedliche Lastzustände ermöglichte. Im Rahmen von mehreren zusammenhängenden mehrtägigen Messungen konnte ermittelt werden, dass die wesentlichen Parameter

für das Betriebsverhalten des Brenners erfasst wurden. Insbesondere folgende Parameter wurden durch die Betrachtung untersucht:

- a) Dauer von Stillstandszeiten wegen fehlender Wärmeanforderungen
- b) Ausgangstemperatur der Brennkammer

In Abstimmung mit Fa. Solvis wurden veröffentlichte Standardlastprofile für Heizwärme- und Warmwasserbedarf erstellt und anschließend dem Gesamtsystem aufgeprägt. Das resultierende Emissionsverhalten wurde gemessen. **"Abweichung von der Aufgabendefinition"**.

1.4.1.7 Anpassung des Simulationsmodells: Netzgenerierung und Modellbildung, Stickoxidemissionen

In einem ersten Schritt wurden die geometrischen Daten der Versuchsanlage in ein Finite-Volumen-Modell (Netzgenerierung) übertragen. Anschließend werden die partiellen Differentialgleichungen der Erhaltungssätze von Energie, Impuls und Masse und mit den an den Reaktionen beteiligten Stoffkomponenten (Brennstoff, Sauerstoff, Abgaskomponenten, Schadstoffe) numerisch gekoppelt.

Um einen Ölbrenner zu simulieren, war zu berücksichtigen, dass das Öl zunächst flüssig als Heizölspray vorliegt und anschließend verdampft. In diesem speziellen Fall wird aber zusätzlich gasförmiges Heizöl über die Verdampferspirale in den Brennraum eingebracht. Die Verbrennung erfolgt mit sichtbarer Flamme, wobei diese Brennertechnologie am Übergang zur flammlosen Verbrennung liegt. Der Ölspray des Primärbrenners wurde durch sogenannte Lagrangepartikel dargestellt, die Darstellung von gasförmigem Brennstoff (Sekundärbrenner) war hierbei unproblematisch. Durch die Einbindung der oben genannten Lagrange-Partikel konnte kein stationärer Löser verwendet werden. Diese Art der Betrachtung erforderte einen transienten (zeitabhängigen) Lösungsalgorithmus. Angesichts des notwendigen Rechenaufwandes von mehreren Wochen auf den lokal verfügbaren Rechnern wurde das Rechenmodell vereinfacht und angepasst.

Es zeigte sich, dass die simulierte Flammenform und Temperaturverteilung im Rezirkulationsrohr deutlich von den Beobachtungen abwich und die Zuschaltung der schadstoffbildenden Reaktionen keine verwertbaren Ergebnisse lieferte, so dass die Grundlage für die Einbindung des Sekundärkreises im Simulationsmodell nicht gegeben war. Für eine detaillierte Untersuchung der vollständigen Problemstellung mittels Simulation müsste die Ölverdampfung im Spray und in der Verdampferspirale detailliert innerhalb einer Multiphysik-Simulation berechnet werden. Hierfür würde erheblich mehr Rechenkapazität und Zeit benötigt als in diesem Projekt eingeplant war bzw. zur Verfügung stand, so dass dieser Ansatz nicht weiter verfolgt wurde. Da die Kooperationspartner Fa. Herrmann GmbH & Co. KG und Solvis GmbH & Co. KG nicht über das entsprechende Know-how verfügten, wurden Präsentationen zur Thematik durchgeführt. **„Teilweise erledigt“**.

1.4.1.8 Optimierung der Gestaltung und Positionierung des Sekundärölverdampfers

In Arbeitsschritt 8 sollte eine Optimierung der Gestaltung und Positionierung des Sekundärölverdampfers insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung einer Baureihe mit Feuerungswärmeleistungen bis **70 kW** (Skale Up) erfolgen. Bedingt durch die in 1.4.1.7 (Arbeitsschritt 7) dargestellten Schwierigkeiten konnte keine Optimierung der Gestaltung und Positionierung des Sekundärölverdampfers durchgeführt werden.

In Abweichung von der Aufgabenstellung wurde daher die Flammrohroptimierung als Teilproblem der begleitenden Simulation festgelegt, da bereits im Vorgängerprojekt /F41/ im Versuch mit einer düsenförmigen Querschnittsverengung im Rezirkulationsrohr experimentiert, diese jedoch nicht quantitativ bewertet wurde.

Das ermittelte Design wurde an die Verhältnisse des Versuchsstandes angepasst, von der zentralen Betriebswerkstatt gefertigt und hinsichtlich des Emissionsverhaltens untersucht. **„Abweichung von der Aufgabenstellung“**.

1.4.1.9 Übertragung: Oberflächenbrenner als Primärbrenner; Modifikation des Versuchsaufbaus

Im neunten Arbeitsschritt war vorgesehen, das Konzept der Sekundäröleinspeisung auf eine Feuerung mit einem anderen Primärbrenner zu übertragen. Hierzu stellte Herrmann Brenner GmbH & Co. KG einen vollständig vormischenden Erdgas-Oberflächenbrenner zur Verfügung, der für den Betrieb mit Heizöl modifiziert wurde. Bei den Modifikationen handelte es sich um konstruktive Umbaumaßnahmen, die von Simulationsrechnungen begleitet wurden.

Die Fertigung der für die Modifikation des Oberflächenbrenners notwendigen Teile sowie die Vorbereitung des Brenners erfolgte in der Werkstatt von Herrmann Brenner GmbH & Co. KG. Eine Unterstützung für den konstruktiven Teil sowie für die Umbauarbeiten am Versuchsstand erfolgte im Rahmen einer Bachelorarbeit. **„Erledigt“**.

1.4.1.10 Messung der Schadstoffemissionen: Parametervariationen

Als abschließender experimenteller Arbeitsschritt war vorgesehen, das Konzept der Sekundäröleinspeisung auf eine Feuerung mit einem Oberflächenbrenner hinsichtlich des Emissionsverhaltens zu untersuchen.

Durch Variation der wichtigsten Verfahrensparameter sollte anschließend die Abhängigkeit der Stickoxidemissionen untersucht werden. Dabei wird grundsätzlich ein vollständiger Ausbrand (Kontrollparameter: CO, C_xH_y, Ruß) angestrebt.

Aus Gründen der besseren Beobachtbarkeit des Flammenbildes sowie aus Gründen der Sicherheit wurde der Versuchsstand zunächst mobil und als Freiluftanlage ausgeführt. Ziel der durchgeführten Versuche war es, einen autonomen Betrieb des neuen Brenners bei stabilem Abbrandverhalten zu erreichen. Dieses Ziel konnte nach mehrmaligen Modifikationen des Brenners innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit nur bedingt erreicht werden. Die Arbeiten zur Verbesserung des Abbrandverhaltens sind Gegenstand einer noch laufenden Projekt- sowie anschließender Bachelorarbeit (Abschluss voraussichtlich Oktober 2015).

Die in diesem Arbeitsschritt angestrebte grundlegende Basis für die Konstruktion und Regelung einer Baureihe konnte somit innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit noch nicht abschließend erarbeitet werden. „**Teilweise erledigt**“.

1.4.1.11 Validierung des Emissionsverhaltens

Die im vorangegangenen Arbeitsschritt als sinnvoll und zielführend im Hinblick auf den niedrigen Stickoxidauswurf erkannten Verfahrensparameter sollten in diesem Arbeitsschritt zusammengestellt und reproduziert werden. Da jedoch der vorangegangene Arbeitsschritt nicht zum Abschluss gebracht werden konnte, wurde auch das Emissionsverhalten des Öloberflächenbrenners nicht mehr validiert. „**Nicht erledigt**“.

1.4.2 Zeitlicher Ablauf des Vorhabens

Der zeitliche Ablauf des Forschungsprojektes ist in Bild 2 als Balkendiagramm dargestellt.

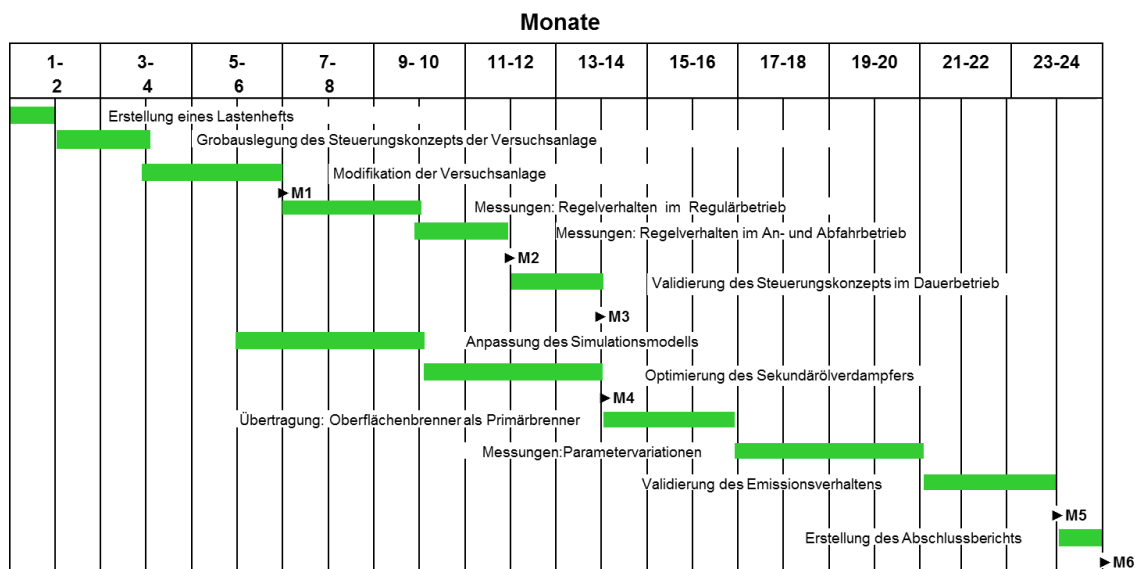


Bild 2: Balkenplan zum Vorhaben „Schadstoffminimierte Verbrennung für flüssige Brennstoffe unter Zugrundelegung eines vollautomatischen Brennerbetriebes“

Die Laufzeit des Vorhabens beträgt zwei Jahre. Der geplante Projektstart war der 01.09.2012. Durch eine späte Zustellung des Zuwendungsbescheides (vorab per E-Mail vom 20.09.2012) konnte dieser Termin nicht eingehalten werden. Darüber hinaus konnten die Stellen der wissenschaftlichen Mitarbeiter erst zum 03.12.2012 besetzt werden. Dementsprechend begann die Bearbeitung des Projektes und somit aller Arbeitsschritte zeitverzögert zum 03.12.2012. Hierdurch konnte das geplante Projektende zum 31.08.2014 nicht eingehalten werden. Ein Antrag auf kostenneutrale Verlängerung wurde am 15.01.2014 eingereicht und am 30.01.2014 durch den Projektträger genehmigt).

Mitarbeitersituation. Die Bearbeitung des Projektes an der Ostfalia erfolgte vom 03.12.2012 bis zum 31.12.2014 durch zwei teilzeitbeschäftigte (66%) Mitarbeiter, wobei zum 01.01.2014 ein nahtloser Personalwechsel bei einer Stelle erfolgte. Dies war dadurch möglich, weil der neue wissen-

schaftliche Mitarbeiter seine Bachelorarbeit auf einem projektbezogenen Themengebiet angefertigt hatte.

Parallel dazu wurden während der Projektlaufzeit drei studentische Hilfskräfte beschäftigt, im Rahmen dieser Tätigkeiten entstanden 2 Vertiefungsprojekt- und 2 Bachelorarbeiten.

1.5 Wissenschaftlich-technischer Stand zu Beginn

Das Emissionsverhalten von Wärmeerzeugern/Kesseln zur Bereitstellung von Warm- und Heizwasser wird im Fall des Brennstoffes Heizöl durch die im Abgas zu messende Größe

- Stickstoffoxide NO_x (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, angegeben als Stickstoffdioxid)

erfasst. Emissionsbegrenzungen zu diesen Stoffen sind z. B. für Heizöl bis zu einer Feuerungswärmeleistung von 10 MW in der Ersten Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz und im Fall einer Feuerungswärmeleistung zwischen 10 und 100 MW in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft angegeben. Der heutige Stand der Technik bezüglich der Schadstoffemissionen lässt sich aus der „Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes“ (1. BImSchV vom 22.03.2010) ableiten:

$\text{NO}_x < 110 \text{ mg/kWh}$ (1. BImSchV, Nennwärmeleistung $< 120 \text{ kW}$)

In der Tabelle 1 sind die NO_x - und CO-Emissionen der verschiedenen Brennertypen, die zurzeit auf dem Markt sind, zusammengefasst /F42/. Der mit dem oben angeführten Prototypen realisierte NO_x -Emissionswert (Bild 4) liegt deutlich unter den aufgeführten NO_x -Werten.

	Leistungsbereich in kW Betriebsweise	Emissionswerte in mg/kWh	
		NO_x	CO
Zerstäubungsbrenner	9-15 (8-18) Zweistufig	100	nahezu 0
Druckluftzerstäuber	7-13 (9-17) Zweistufig	75-90	nahezu 0
Verdampfungsbrenner	4,8-13 stufenlos modulierend	120-160	nahezu 0-100
Oberflächenbrenner	5,1-11,7 (6,1-15,2) stufenlos modulierend	46-104	11
Herkömmlicher Zerstäubungsbrenner	18 Einstufig	< 80	10

Tabelle 1: Emissionswerte handelsüblicher Ölbrennertypen (nach /F43/)

Die relativ hohe Toxizität der Stickstoffoxide (insbesondere von Stickstoffdioxid), die z. B. saure Niederschläge verursachen und im Zusammenhang mit der bodennahen Ozonbildung stehen können, sind besonders zu beachten, so dass eine weitest gehende Verringerung des Auswurfs dieser Schadstoffe angestrebt werden muss. Die Simulation des Verbrennungsprozesses einschließlich seiner Schadstoffbildung wurde bereits im vorangegangenen AiF-geförderten Vorhaben „Stickoxidarme Verbrennung in einer neuartigen Feuerung für flüssige Brennstoffe“ (AiF ProfUnt

FKZ 1791X08) implementiert. Daher wird auf eine detaillierte Darstellung der Schadstoffwirkung, NO_x-Bildungsmechanismen sowie der Minderungsmaßnahmen in diesem Antrag verzichtet. Verwiesen werden soll an dieser Stelle nur auf die einschlägigen Literaturstellen F1 bis F14. Erkenntnisse auf dem Gebiet der flammlosen Oxidation beziehen sich meist auf gasgefeuerte Brennersysteme; Literaturstellen hierzu werden zwar aufgeführt, deren Inhalte aber nur in zusammenfassender Form dargestellt.

Bekannte Stickoxid-Minderungsmaßnahmen

Über systematische Bemühungen zur Stickoxidminderung wird seit etwa 1970 im Schrifttum berichtet. Dabei sind die grundsätzlichen Maßnahmen - wie in /F2, F3, F4, F6, F8, F9, F10, F11, F12, F13, F14/ dargestellt - fast alle angewendet worden, wobei hier nur - aus Gründen der Zielrichtung des Forschungsvorhabens - auf Primärmaßnahmen eingegangen werden soll:

Nr	Maßnahme	Wirkungsweise
1	nahstöchiometrische Verbrennung	Senkung des Sauerstoffpartialdruckes
2	Beeinflussung des Mischungsverlaufs (gestufte Verbrennung) a) Luftstufung b) Brennstoffstufung	Beeinflussung der Stickoxidbildung a) durch z. B. unterstöchiometrische mit anschließender überstöchiometrischer Fahrweise. b) durch z. B. zunächst stark überstöchiometrische Verhältnisse und spätere erneute Brennstoffzufuhr. (a) und b) meist in Kombination mit Nr. 3) (Durch Erzeugung einer Drallkomponente kann der Mischungsverlauf von Brennstoff und Luft zusätzlich beeinflusst werden.)
3	direkte Flammenkühlung	Wärmeabfuhr aus der Flammenfront (i. d. R. Flammenstrahlung). Ist bei außen gekühlten Brennraumwänden ohnehin vorhanden. Verbessernd wirkt sich z.B. der Einsatz von Brennerkühlstäben oder Oberflächen-/Poren-Brennern evtl. mit katalytisch wirkender Oberfläche aus.
4	Abgasrezirkulation a) externe Rezirkulation b) interne Rezirkulation	Senkung der Verbrennungstemperatur oder/ und des Sauerstoffpartialdruckes a) Rückführung von kalten, sauerstoffarmen Abgasen in die Feuerung durch äußere Kanäle. b) Rückführung von Gasen (intern) aus dem Brennraum in die Flammenwurzel durch z. B. Injektoreffekte oder überkritischen Drall. Durch Vorbeiführen dieser Gase an gekühlten Flächen sinkt neben dem Sauerstoffpartialdruck auch die Temperatur.

5	Verringerung der Luftvorwärmung (sofern vorhanden)	Senkung der Verbrennungstemperatur
6	Wassereinspritzung	Senkung der Verbrennungstemperatur durch Wasserverdampfung
7	Abwechselnd unter- und überstöchiometrische Fahrweise (nur bei Großkesseln mit mehreren Brennern)	Wirkungsprinzip ähnlich der gestuften Verbrennung (siehe Nr. 2)

Tabelle 2: Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung und deren Wirkungsweise

Moderne Brenner (mit Flammenverbrennung) nutzen in der Regel eine Kombination von Maßnahmen zur Unterdrückung der Stickoxidbildung, wie beispielsweise anhand von /F14/ deutlich wird. Dort wird über erreichte Stickoxidemissionen (je nach Kesseltyp) von (80 ... 100) mg / m³_n (NO₂, 3 Vol.-% O₂) berichtet, im Teillastbetrieb liegen die Konzentrationen teilweise noch darunter. Damit scheint das Stickoxidminderungspotential konventioneller Feuerungssysteme weitgehend ausgeschöpft, wie auch anhand von /F1/ bestätigt worden ist.

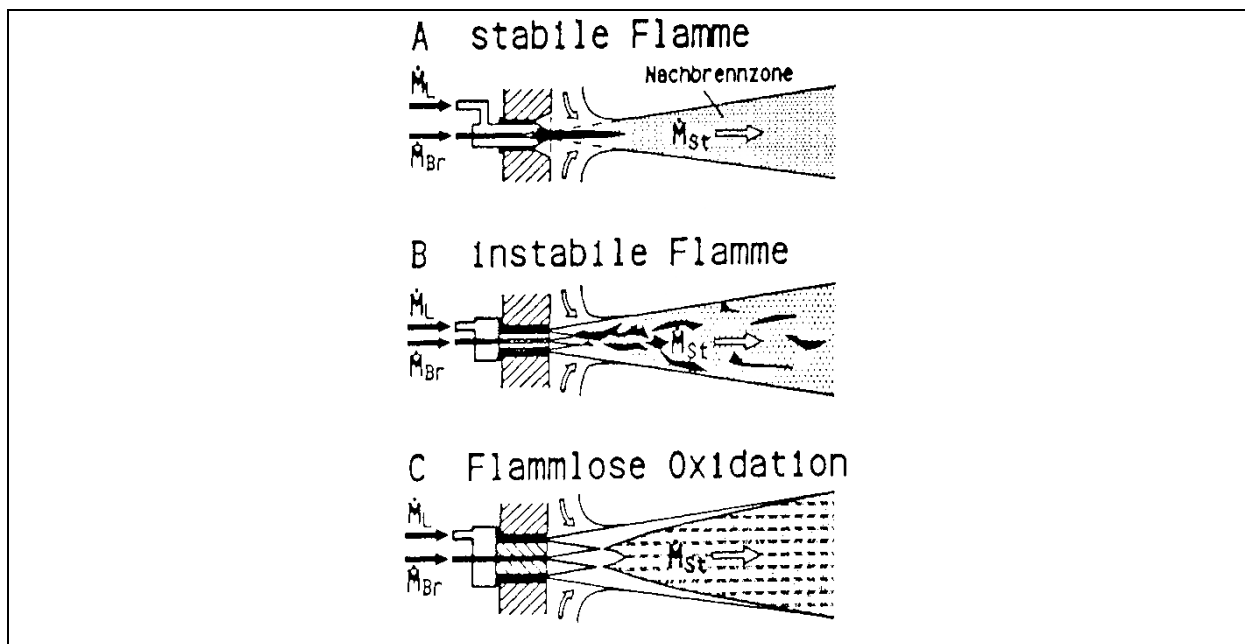


Bild 3: Stabilitätsbereiche (schematisch) nach /F15/

In jüngerer Zeit wird vermehrt das Prinzip der flammlosen Verbrennung beschrieben (/F15/ - /F25/), das als weitere Maßnahme zur Unterdrückung der Stickoxidbildung vor allem im Zusammenhang mit Industrieöfen (Hochtemperaturprozessen) Anwendung findet. Es basiert in Anlehnung an Bild 3 /F15/ auf dem Prinzip einer (hohen) internen Abgasrezirkulation, die mit Hilfe eines (extrem) hohen Impulses der Verbrennungsluft erzeugt wird, so dass sich über den Injektoreffekt die Verbrennungsluft so viel Abgas (mit niedrigem Sauerstoffgehalt) ansaugt (Fall C in Bild 3), dass eine Flammenbildung bzw. Flammenstabilisierung am Brennermund unterbleibt. Nach /F15/ ist eine Mindestbrennraumtemperatur von 850 °C notwendig, weil sonst die Zündbedingungen für den FLOX®-Betrieb nicht mehr gegeben sind. In Hochtemperaturprozessen konnten die Stickoxidkonzentrationen durch dieses Verbrennungsprinzip von 2.000 mg/m³(i.N.) auf 200 mg/m³(i.N.) (je-

weils bezogen auf NO_2 , 5 Vol.-% O_2) gesenkt werden. Beim Einsatz in Glasschmelzöfen, wo diese Technologie unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in Glasschmelzwannen untersucht wurde, konnte immerhin eine Reduktion von über 50 % erzielt werden /F24/.

Die Anwendung des Prinzips der flammlosen Verbrennung in ohnehin vorhandenen Ofen- oder Brennräumen ist naheliegend, weil hier über die heißen Wände die Startbedingungen für die Oxidationsreaktion geschaffen bzw. verbessert werden. Untersuchungen im Zusammenhang mit thermischen Nachverbrennungsanlagen, die i. d. R. bei stark überstöchiometrischen Verhältnissen ($\text{O}_2 > 15$ Vol.-%) organische Schadstoffe in Form von Lösemitteln oxidieren und auch über nahezu adiabate Brennräume verfügen, haben gezeigt, dass die flammlose Oxidation durch vorheriges Zumischen von Erdgas zur Verbrennungsluft realisierbar ist und erwartungsgemäß zu extrem niedrigen Stickoxidkonzentrationen führt /F15/. Neuere Untersuchungen mit N-haltigen biogenen Schwachgasen zeigten eine NO_x -Reduktion von 45 % /F25/. Die Anwendung auf ölgefeuerte Brennkammern mit Blickrichtung auf industrielle Anwendungen ist in /F26/ und /F27/ beschrieben, wobei der Schwerpunkt auf den Abgleich zwischen Experiment und numerischer Simulation gelegt wurde, ohne quantitative Aussagen hinsichtlich des Emissionsverhaltens zu treffen. Beim Einsatz der FLOX®-Technologie in Mikro-Gasturbinen konnten NO_x -Minderungen von ca. 80% erzielt werden /F28/. Die Einsatz- und NO_x -Minderungsmöglichkeiten in industriellen Kohlenstaubfeuerungen werden in /F29-F31/ untersucht. Dass beim FLOX®-Betrieb keine Flammenbildung erfolgt, liegt neben der geschickten geometrischen Anordnung am extrem hohen Luftüberschuss und den dadurch verhinderten Flammenstabilitätsbedingungen. Derartige Voraussetzungen sind im hier betrachteten Fall (O_2 -Gehalt < 3 Vol.-%) von vornherein nicht vorhanden, sondern müssen durch die Verfahrensführung erst geschaffen werden. Der Aufbau und die Funktionsweise spezieller Ölverdampfungsbrenner für den Haushaltsbereich ist in /F32/ (Pflanzenöl) und /F33/ (Filmverdampfer für Heizöl) beschrieben. Möglichkeiten der emissionsarmen Verbrennung flüssiger Brennstoffe in sogenannten Porenbrennern sind z.B. in /F34-F38/ dargestellt.

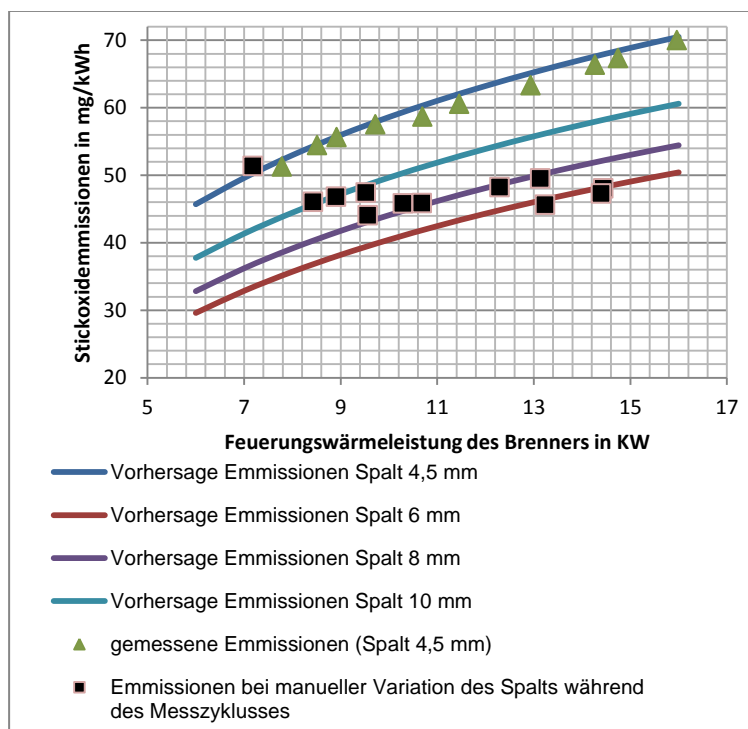


Bild 4: Stickoxidemissionen des neuartigen Ölbrenners in Abhängigkeit von der Feuerungs-wärmeleistung

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes „Stickoxidarme Verbrennung in einer neuartigen Feuerung für flüssige Brennstoffe“ (AiF ProfUnt FKZ 1791X08) wurde von den Antragstellern eine Feuerung untersucht, bei der die Verbrennung und Verdampfung des flüssigen Brennstoffes nicht, wie bei herkömmlichen Ölbrennern, miteinander verknüpft, sondern apparativ voneinander entkoppelt sind. Es konnte gezeigt werden, dass durch den neuartigen Aufbau des Brenners sowie die konsequente Anwendung von Primärmaßnahmen die Raten der externen Rezirkulation, welche einer Schadstoffentstehung innerhalb des Verbrennungsprozesses entgegenwirkt, erhöht und somit die Stickoxidemissionen in einem Leistungsbereich von 7 kW bis 16 kW sicher unter 50 mg/kWh gehalten werden können, was gegenüber herkömmlichen Brennern eine Verbesserung um mehr als 20% darstellt (Bild 4). Solche größeren Rezirkulationsraten führen bei herkömmlichen Brennern zu einer instabilen Verbrennung bis hin zum Abbruch des Verbrennungsprozesses. Gleichzeitig konnte der Nachteil herkömmlicher Brenner hinsichtlich einer stufenlosen Leistungsregulierung behoben werden.

Bei den Untersuchungen konnte jedoch festgestellt werden, dass es bislang keine Regelungs- und Steuerungsstrategie für diese Primärmaßnahmen gibt. Alle untersuchten Betriebszustände mussten von Hand eingestellt werden. Gleiches gilt für ein emissionsarmes An- und Abfahren des Brenners. Die bisher in der Praxis eingesetzten Steuerungsprogramme sind für eine bedarfsabhängige Regulierung der Feuerungswärmeleistung und Steuerung der Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung nicht ausgelegt.

Mit der sich öffnenden Schere zwischen erforderlicher Brennerleistung zur Heizwärme- bzw. Warmwasserbereitstellung im Neubaubereich sowie im energetisch sanierten Gebäudebestand auf der anderen Seite stellen sich neue Herausforderungen an die Modulationsfähigkeit von Brennern für Flüssigbrennstoffe. Auf der anderen Seite erfordert die zunehmende Kombination konventioneller Kesseltechnik mit Systemen zur regenerativen/rationellen Energienutzung (Solarkollektoren bzw. Wärmepumpen und BHKW) zunehmende Anforderungen an die Modulationsfähigkeit von Brennersystemen. Dies ist bei gegenwärtig im Handel befindlichen Ölbrennern nur sehr bedingt möglich.

Für Brenner im kleineren Leistungsbereich eignen sich besonders Oberflächenbrenner. Bei diesen besteht der Brennerkopf aus einem porösen Material. Dafür wird in der Regel hitzebeständige Metall- oder Keramikfaser /F35/ oder gelochtes Metallblech /F40/ verwendet (Bild 5). Der Brennstoff wird in einer geeigneten Vorrichtung verdampft oder sehr fein vernebelt und anschließend mit Luft vorgemischt. Anschließend verbrennt das Gemisch beim Durchströmen des Brennerkopfes. Aufgrund der hierin vorliegenden kleinen Strömungskanäle wird die freiwerdende Reaktionswärme sehr gut an das Material des Brennerkopfes übertragen. Der Brennerkopf überträgt die Wärme zum großen Teil durch Strahlungstransport an die Wände der Brennkammer. Die Oberflächentemperatur des Brennerkopfes stellt sich zwischen 700 °C und 900 °C ein. In diesem Temperaturbereich ist die Bildung von thermischem NO_x gehemmt. Die Brenner zeichnen sich damit durch extrem niedrige NO_x -Emissionen aus. Bei solchen Brennern sind schon NO_x -Emissionen kleiner als 15 ppm erreicht worden. Ein weiterer Vorteil der Oberflächenbrenner besteht darin, dass diese auf Grund der laminaren Strömung sehr pulsationsfrei und geräuscharm sind /F35/.

Bei geringer Leistung arbeitet der Brenner im Bereich maximaler Infrarotstrahlung. Hierbei werden nach /F35/ etwa 30 % der Reaktionswärme durch Strahlung abgeführt. Ab einer bestimmten Brennerleistung tritt der sogenannte „Blue Flame Limit“ Effekt auf. Die aus dem Brennerkopf austretenden Verbrennungsgase werden bläulich sichtbar. Die Temperatur in der Flamme steigt dann an, und damit nimmt auch die NO_x -Emission relativ stark zu.

In Bezug auf die Form des Brennerkopfes unterscheidet man /F35/:

- ebenflächige Brenner
- zylindrische Brenner (**Bild 5**)
- halbkugelförmige Brenner

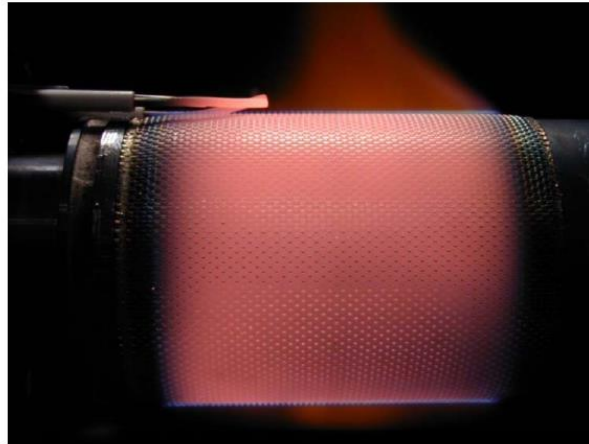


Bild 5: Zylindrischer Oberflächenbrenner im sogenannten Strahlungsbetrieb /F40/

Dagegen verbrennen Porenbrenner, auch als „Volumenbrenner“ bezeichnet, vorgemischte Luft-/Brennstoffgemische flammenfrei innerhalb eines dreidimensionalen („volumetrischen“) Porenkörpers, dem Porenreaktor. Porenbrenner können deshalb auch als 3D-Erweiterung von sogenannten Oberflächenbrennern betrachtet werden. Die Grundlagen dieses Brennertyps sind in /F38/ beschrieben. Eine erhebliche Erhöhung der Leistungsdichte bei deutlich größerem Dynamikbereich und geringen Emissionen über den gesamten Leistungsbereich ist die Folge. Der glühende Reaktor liefert darüber hinaus einen hohen IR-Strahlungsanteil ohne jegliche Flammenbildung an der Oberfläche /F36/.

Das voll vorgemischte Luft-/Brennstoffgemisch wird zunächst durch eine erste Verteil- und Vorwärmzone geleitet (Region A in Bild 6). Diese ist als poröse Platte mit definierter Lochstruktur ausgestattet und verhindert ein vorzeitiges Zünden des Gemisches und damit ein Zurückschlagen der Flamme. Innerhalb der sich anschließenden Reaktionszone (Region C, Reaktor) stabilisiert sich die Verbrennung – das Gemisch wird also in den Poren der Region C chemisch umgesetzt, das heißt verbrannt /F36/.

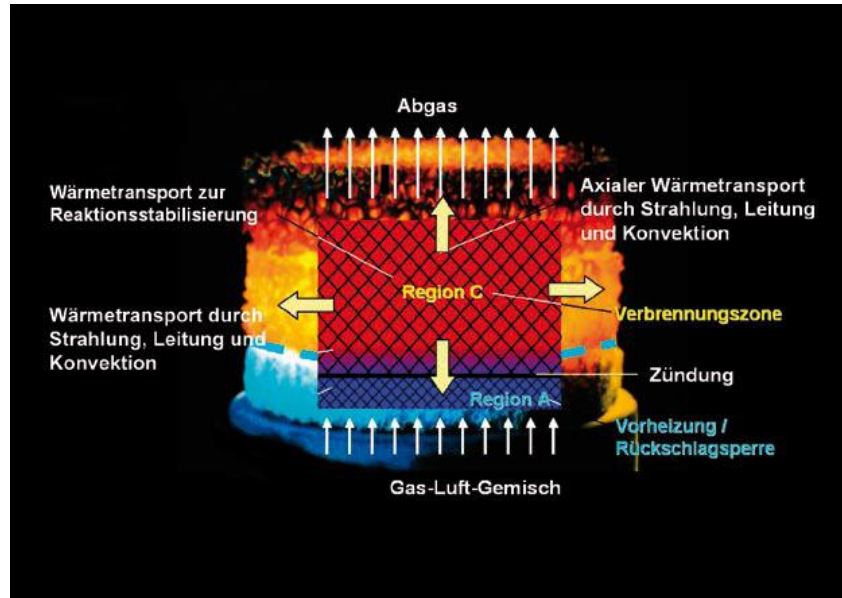


Bild 6: Funktionsprinzip eines Porenbrenners /F36/

Nach /F36/ können Porenbrenner (gilt auch für die oben beschriebenen Oberflächenbrenner) mit allen konventionellen Brennersteuerungen für Vormischbrenner betrieben werden. Es gibt keine weitergehenden Anforderungen in Bezug auf Regelung oder Sicherheit. Die Zündung erfolgt normalerweise mit einer Zündelektrode. Glühkerzen oder -zündler können in Sonderfällen ebenso eingesetzt werden. Zur Flammenüberwachung wird, wie bei anderen Brennern, eine Ionisationselektrode eingesetzt. Darüber hinaus können UV-Sonden oder Flackerlichtsensoren sowie im Einzelfall auch Temperatursensoren zum Einsatz kommen.

Mit dem heute vor allem im Heizungsbereich als Standardlösung eingesetzten pneumatischen Gas-Luft-Verbund, bei dem mit Hilfe einer Venturidüse das Gas dem Luftstrom zudosiert wird, lässt sich die Brennerleistung im Verhältnis 1:8 modulieren. Mit einer speziellen Venturi-Mischdüse vor dem Gemisch-Gebläse soll nach /F36/ auch ein Modulationsbereich bis 1:20 möglich sein.

Als besondere Herausforderung ist dabei die Verdampfung des flüssigen Brennstoffes z.B. des Heizöls anzusehen. Erfolgt die Verdampfung im Bereich hoher Wärmestromdichten neigen molekular langkettige flüssige Brennstoffe (z.B. Heizöl) zur Verkokung, die mittel- und langfristig zum Zusetzen des Verdampfers führt, was dann zwangsläufig mit einer Störung des Brennerbetriebes einhergeht. Einige Hersteller (beschrieben in /F34/, /F36/ und /F37/) von Porenbrennern setzen daher auf die sogenannte "kalte Flamme" /F39/.

Das besondere Phänomen des auf diesem Prinzip beruhenden Verdampfers wird in /F34/, /F37/ und /F39/ beschrieben (Bild 7). Es liegt darin begründet, dass die zur Verdampfung des Brennstoffes notwendige Energie nicht von außen zugeführt wird, sondern dem Brennstoff selbst entnommen wird. Dies ist dadurch möglich, dass der Brennstoff in dem Verdampfer eine so genannte Niedertemperaturoxidation („**Kalte Flamme**“ - "**KF**") durchläuft, bei der ein Teil der Brennstoffenthalpie in Wärme umgesetzt wird und somit zur Aufbereitung des Brennstoffes zur Verfügung steht. Dies ermöglicht, den Verdampfungsprozess nach einer Startphase, in der die Luft elektrisch vorgeheizt wird, ohne weitere externe Energiezufuhr ablaufen zu lassen. Da diese Niedertemperaturoxidation sich in einem Temperaturbereich von circa 450°C - 480°C stabilisiert (nach /F34/ tritt diese zwischen 320°C und 480°C auf), ist sichergestellt, dass der gesamte Brennstoff in die Gasphase überführt wird. Da die Energie nicht über Oberflächen auf den Brennstoff übertragen wird, ist nach /F37/ die Gefahr der Bildung von Ablagerungen deutlich reduziert. Die Gestaltung des

Verdampfers erlaubt es dabei, den Brennstoffmassenstrom in einem weiten Bereich zu modulieren (zum Beispiel von 0,2-1,7 kg/h), ohne dass es zum Abbruch der Reaktionen kommt. Nach F/34/ ist der sogenannte Anfahrbetrieb aber erst nach 30 Minuten abgeschlossen und der Modus eines "autarken" (ohne externe Zusatzheizung) Betriebes erreicht. Dies lässt den Schluss zu, dass derartige Brennersysteme nur für Wärmeerzeuger mit langen produktionsbedingten Zyklen oder für Brenner in Heizkesseln, kombiniert mit einem Pufferspeicher, geeignet sind.

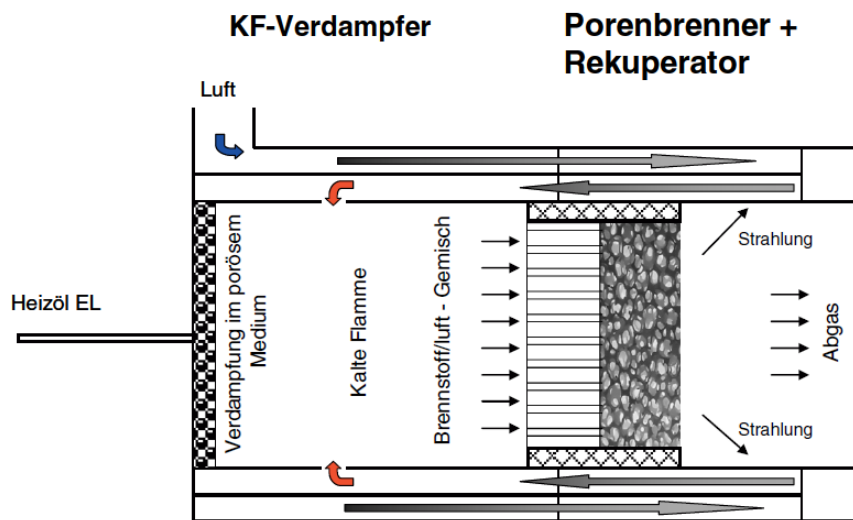


Bild 7: Funktionsschema des Pyrlinnobrenners /F34/

Ein anderes Prinzip des Verdampfers verfolgte die Fa. Herrmann /F40/. Bei dem dort in der Entwicklung befindlichen Prototyp eines zylindrischen Oberflächenbrenners (Bild 8) wird der flüssige Brennstoff mit Hilfe einer elektrischen Zusatzheizung verdampft. Der Vorteil dieses Prinzips besteht in der Realisierung sehr kurzer An- und Abfahrzeiten des Brenners. Der Nachteil liegt in der Notwendigkeit einer ständigen Zufuhr elektrischer Hilfsenergie während des Brennerbetriebes (je nach Brennerleistung: 20 bis 100 W) und damit einen relativ hohen Verbrauch hochwertiger und teurer elektrischer Energie.

Eine Kombination des im vorangegangenen AiF geförderten Vorhabens (AiF ProfUnt FKZ 1791X08) entwickelten und erprobten Verdampfungsverfahrens mit einem vormischenden Flächenbrenner war nach Ansicht des Projektleiters und der beteiligten Kooperationspartner sehr vielversprechend. Damit würde die Möglichkeit der Dosierung kleinster Brennstoffmassenströme mit den verfahrenstechnischen Vorteilen eines Flächenbrennersystems verknüpft. Diese liegen in einem geräuscharmen Betrieb, niedrigen Abgasemissionen und hoher Modulation der Feuerungsleistung bei guter Stabilität der Flamme und geringem Bedarf an elektrischer Hilfsenergie – letztere wird nur für den Anfahrvorgang benötigt.

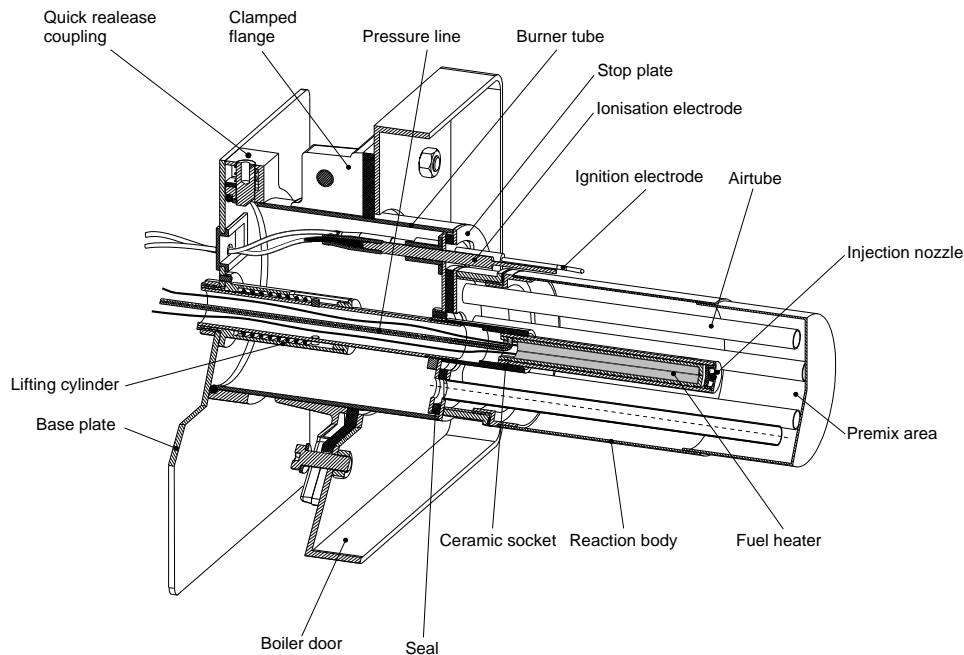


Bild 8: Schnittzeichnung des Prototyps eines zylindrischen Oberflächenbrenners /F40/

1.6 Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden

Das diesem Projekt zugrunde liegende Verfahren ist in /P1/ beschrieben. Im Rahmen einer weltweiten Patentrecherche wurden die im Zusammenhang mit dem Vorhaben nennenswerten Patente analysiert. Konventionelle Blaubrenner sind beispielsweise aus /P2/ oder /P3/ bekannt.

Auch bei Anlagen, die statt eines Vernebelungs- oder Sprühprozesses einen Verdampfungsprozess für flüssige Brennstoffe beinhalten, besteht zum einen die Gefahr von Ablagerungen im Verdampferbereich durch Crackreaktionen und zum anderen liegt das Siedende von Ölen je nach Zusammensetzung oberhalb der Selbstzündtemperatur. Eine solche Anlage ist beispielsweise aus /P4/ bekannt. Diese zeigt eine Heizvorrichtung für Pflanzenöl, bei der der Brennstoff, nämlich Pflanzenöl, im Brennraum durch ein Leitungssystem geführt und aufgeheizt wird.

Aus /P5/ ist ein Gasbrenner für verdampften flüssigen Brennstoff bekannt, bei dem die Verbrennung von Pflanzenöl mit einer beispielsweise mit Kerosin oder Dieselöl betriebenen externen Zündvorrichtung gestartet wird. Zum Starten eines Brennvorgangs wärmt die Zündvorrichtung die Verdampferschlange vor. Die so entstehende Wärme reicht aus, um den Verdampfungsprozess in der Verdampferrohrschlange zu starten und einen austretenden Gasstrom zu entzünden.

Brenner, die nach dem Verfahren der Flammlosen Oxidation arbeiten, wurden beispielsweise in /P6/ und /P7/ beschrieben. Verfahren im Zusammenhang mit Oberflächenbrennern finden sich in /P8/ bis /P12/.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes „Stickoxidarme Verbrennung in einer neuartigen Feuerung für flüssige Brennstoffe“ (AiF ProfUnt FKZ 1791X08) wurde an der Ostfalia eine Feuerung untersucht, bei der die Verbrennung und Verdampfung des flüssigen Brennstoffes nicht, wie

bei herkömmlichen Ölbrennern, miteinander verknüpft, sondern apparativ voneinander entkoppelt sind (siehe /P1/).

Da aus diesem Vorgängerprojekt ein funktionsfähiger Versuchsaufbau zur Verfügung stand, wurde der zuvor verwendete Blaubrenner durch ein vergleichbares Modell des Kooperationspartners Herrmann Brenner GmbH & Co KG ersetzt. Für den Anfahrbetrieb des Ölbrenners wird ein so genannter Blaubrenner der Firma Herrmann mit einer zweistufigen Feuerungsleistung von 10 - 18 kW als Primärbrenner HLZ 45 /F43/ verwendet.

Für die Untersuchung des modifizierten Oberflächenbrenners wurde als Basis ein Gasbrenner des Kooperationspartners Fa. Herrmann verwendet /F45/.

1.7 Verwendete Fachliteratur

- /F1/ Kolar, J.: Stickstoffoxide und Luftreinhalteung. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1990, S. 35
- /F2/ de Soete, G.: Physikalisch-chemische Mechanismen bei der Stickstoffoxidbildung in industriellen Flammen. Gas wärme international, Band 30 (1981) Heft 1, S. 15/23
- /F3/ Kremer, H. u. a.: NO_x-Entstehung in Feuerungen. In: NO_x -Minderung bei Feuerungen, VGB-TB 310, S. 24/43. Essen: VGB-Kraftwerkstechnik, 1984
- /F4/ Johnson, P.; Kolb, T.; Leuckel, W.: HCN - ein wichtiges Zwischenprodukt bei der NO Bildung in turbulenten Diffusionsflammen. VDI-Berichte Nr. 765 (1989), S. 231/244
- /F5/ Cremer, H.: Zur Reaktionstechnik der Methanoxidation. Chemie-Ing.-Techn. Jg. 44 (1972) N r. 1+2, S. 8/15
- /F6/ Kremer, H.; Skunca, I.: Untersuchung der Bildung von Stickstoffoxiden in häuslichen und gewerblichen Gasfeuerstätten. Gaswärmeinstitut e. V. Bericht Nr. 2821, Essen 1978
- /F7/ Meier zu Köcker, H.: Verbrennung N-haltiger Verbindungen. VDI-Berichte 525 (1985), S. 333/380
- /F8/ Fenimore, C. P.: Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. Thirteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh 1970, S. 373/380
- /F9/ Lütze, K.: Emissionen von Stickstoffoxiden aus Feuerungsanlagen (Industrie, Haushalt); Staub - Reimhalt. Luft 35 (1975) Nr. 4 April, S. 127/136
- /F10/ van der Kooij, J.: Einfluss der Brennstoffart auf die Stickoxidbildung in Kesselfeuerungen. VGB Kraftwerkstechnik 57, Heft 10, Oktober 1977, S. 679/648
- /F11/ Joos, L.; Menzel, O.: Maßnahmen zur Reduzierung der NO_x-Emissionen von Gasbrennern. gwf-gas/erdgas 126 (1985) H. 2, S. 73/86
- /F12/ Diehl, H.: Emissionen und NO_x-Minderung bei gasgefeuerten Großkesselanlagen. Gas wärme international 36 (1986) Heft 4, S. 212/216
- /F13/ Sattelmayer, T.; Knöpfel, H.-P.; Marling, T.; Peter, H.: Ultra Low NO_x-Vormischverbrennung von Gas und Öl in Kesseln mittlerer Leistung. VDI Berichte Nr. 1090, 1993, S. 147/154
- /F14/ Schopf, N.; Smit, W.: Neue Brennergeneration für Wasserrohrkessel ohne externe Rauchgaszirkulation. VDI Berichte Nr. 1193, 1995, S. 277/248
- /F15/ Wünning, J. G.: Flammlose Oxidation: Verbrennung mit geringer Stickoxidbildung auch bei höchster Luftvorwärmung. VDI-Berichte 1029, 1993, S. 521/534
- /F16/ Flamme, M.; Wünning, J.: Stand der NO_x Minderungstechnik bei der Prozesswärmeerzeugung mit Erdgas und hochvorgewärmter Luft. VDI Berichte Nr. 922, 1991, S. 305/314
- /F17/ Flamme, M.: Eine Möglichkeit zur Reduktion der NO_x Emissionen. Wärmetechnik 1/1995, S. 18/25
- /F18/ Wünning J.A., Wünning J.G., Flameless Oxidation to Reduce Thermal NO-Formation, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 23, Seite 81-94, 1997
- /F19/ Wünning J.G., Flameless Combustion in the Thermal Process Technology, 2nd International Seminar on High Temperature Combustion, Stockholm, Sweden, 2000
- /F20/ Wünning J.G., FLOX® - Flameless Oxidation, Thermprocess Symposium, VDMA, Düsseldorf, 2003
- /F21/ Wünning J.G., Flameless Combustion and its Applications, 14th IFRF Members Conference, Noordwijkerhout, Mai, 2004
- /F22/ Nitsche, M.: Erfassung lösemittelhaltiger Abluft. Seminar "Moderne Verfahren der Abgasreinigung",

- Haus der Technik, Essen, 18.09.1996
- /F23/ Farago, Z.: Online-Dokument <http://www.farago.info/job/Verbrennungen/DritteBrenner.pdf> (Stand 20.02.2007)
- /F24/ Scherello, A.; Konold, U.; Görner, K.: Anwendung der flammenlosen Oxidation für Glasschmelzwannen mit rekuperativer Luftvorwärmung - Glas-FLOX®, VDI-Berichte Nr. 1988, 2007, 23. Deutscher Flammentag
- /F25/ MacLean, S.; Tali, E.; Giese, A.: Brennerentwicklung zur Minderung der NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von N-haltigen biogenen Produktgasen, VDI-Berichte Nr. 2119, 2011, 25. Deutscher Flammentag
- /F26/ Dinkov, I.; Odinius, M.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.: Experimentelle und theoretische Untersuchung der Mischung und Verbrennung bei der flammenlosen Oxidation flüssiger Brennstoffe, VDI-Berichte Nr. 2056, 2009, 24. Deutscher Flammentag
- /F27/ Dinkov, I.; Odinius, M.; Habisreuther, P.; Bockhorn, H.: Flammenlose Oxidation flüssiger Brennstoffe in Brennkammern mit engem Umschließungsverhältnis, VDI-Berichte Nr. 2119, 2011, 25. Deutscher Flammentag
- /F28/ Scherer, V.: Online-Dokument http://www.energieforum.rub.de/Energietag05/Energietag05_7_Scherer_Mikrogasturbinen.pdf (Stand 10.11.2011)
- /F29/ Kellermann, A.; Heil, P.; Förster, M.; Kneer, R.: NO_x-Emission in Oxycoal-Prozessen mit flammloser Verbrennung, VDI-Berichte Nr. 2119, 2011, 25. Deutscher Flammentag
- /F30/ Stadler H.: Experimental and Numerical Investigation of Flameless Pulverised Coal Combustion, Dissertation, RWTH Aachen (2010)
- /F31/ Stadler, H.; Ristic, D.; Förster, M.; Schuster, A.; Kneer, R.; Scheffknecht, G.: NO_x-Emissions from Flameless Coal Combustion in Air, Ar/O₂ and CO₂/O₂, Proceedings of the Combustion Institute 32 (2009) S. 3131-3138
- /F32/ Wurst, Th. K.; Pfitzner, M.; Stumpf, E. H.: Entwicklung und Bewertung eines Pflanzenölbrenners. , VDI-Berichte Nr. 2056, 2009, 24. Deutscher Flammentag
- /F33/ Eisfeld, F.: Verdampfungsbrenner mit minimiertem Schadstoffausstoß für Hausheizungen. VDI-Berichte Nr. 2056, 2009, 24. Deutscher Flammentag
- /F34/ Ausmeier, S.; Jovicic, V.; Karic, B.; Kulisiewicz, L.; von Issendorff, F.; Delgado, A.; vom Schloss, J.; Paesler, L. Jaschinski, C.; Lucka, K.; Koehne, H.: PyrlInno: Entwicklung eines Kleinstbrenners für flüssige Brennstoffe - Ergebnisse der Demonstrationsversuche. VDI-Berichte Nr. 2056, 2009, 24. Deutscher Flammentag
- /F35/ Online Dokument http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel8_VerbrennungSS2003.pdf (Stand 17.11.2011)
- /F36/ Online Dokument http://www.promeos.com/cms/upload/pdf/promeos_technologie_folder_deutsch_2007.pdf (Stand 17.11.2011)
- /F37/ Online Dokument http://www.promeos.com/cms/front_content.php?idart=366 (Stand 17.11.2011)
- /F38/ Trimis, D.; Durst, F.: Combustion in Porous Medium - Advances and Applications. Combustion Science and Technology 121, S. 153-168 (1996)
- /F39/ Lucka, K.; Köhne, H.: Usage of cool flames for the evaporation of Liquid Fuels. 5th CleanAir, Portugal (1999)
- /F40/ Präsentationsunterlagen der Fa. Herrmann GmbH & Co.KG, Waiblingen, 2011
- /F41/ Abschlussbericht zum AiF-geförderten Vorhaben „Stickoxidarme Verbrennung in einer neuartigen Feuerung für flüssige Brennstoffe“, Fertigstellung zum 31.03.2012
- /F42/ Hüser, P.: Stand der Entwicklung bei Ölfuerungsanlagen kleiner Leistung (<15kW) Diplomarbeit, Technische Fachhochschule Berlin März 2005
- /F43/ Herrmann GmbH und Co.KG: HLZ 45 Neue Ölbrenner-Generation für Brennwertkessel. Waiblingen, 2012
- /F44/ Blesl, M.; Kempe, S.; Ohl, M. u.a.: Wärmeatlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen; Forschungsbericht FZKA-BWPLUS; Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart 2008
- /F45/ Herrmann Brenner : Gasbrenner HG Z/M 30s - Montage- und Betriebsanleitung <http://www.herrmann-burners.de/files/content/herrmann/Montage->

- %20und%20Betriebsanleitungen/HGZM30_MB.pdf (Stand: 03.02.2015)
- /F46/ BST Solutions GmbH (2012): KLC 2002 Technische Informationen. Breitbandflammenwächter KLC 2002 für Ölflammen im intermittierenden Brennerbetrieb. Ratingen
- /F47/ Satronic AG: IRD 1010.1 Infrarot-Flackerdetektor: Flammenüberüberwachungseinrichtung für gelb oder blau brennende Ölflammen. Dielsdorf
- /F48/ Baumann, P. (2012): Parameterextraktion bei Halbleiterbauelementen: Simulation mit PSPICE. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag
- /F49/ Krohne Messtechnik GmbH (2013): Optiflux 1000 Technisches Datenblatt: Magnetisch-induktiver Messwertaufnehmer in Sandwich-Ausführung. Duisburg
- /F50/ Rummich, E. (2004): Elektrische Schrittmotoren und -antriebe: Funktionsprinzip-Betriebseigenschaft-Messtechnik. 3. Aufl. Renningen: Expert-Verlag GmbH
- /F51/ Oriental Motor CO. (2010): 2-Phase Stepping Motor Unit RBK Series: Operating Manual
- /F52/ haustechnikdialog: http://www.haustechnikdialog.de/SHKwissen/Images/Vormisch-Brenner_mit_Metallgewebe-Riello.jpg (Stand 07.02.2015)
- /F53/ Buderus Heiztechnik GmbH (Hg.):Handbuch für Heizungstechnik 33. Auflage; Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH, 1994
- /F54/ Ernst-Rudolf Schramek/ TU Dortmund (Hg.) – Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 75. Auflage München: Oldenbourg Industrieverlag, 2011 ISBN 978-3-8356-3200-4

Verwendete Patentschriften

- /P1/ Meyer, H.; Potempa, T.; Ermgasen, H.: Verfahren zur Verdampfung und Verbrennung von Flüssigbrennstoff; DE102006034479B4, 2010
- /P2/ Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V.: Einstellbarer Blaubrenner. DE 44 30 888 A1 (1994)
- /P3/ Bailey F. W.: BLAUBRENNER UND VERFAHREN ZUR AUFRECHTERHALTUNG EINER BLAUEN FLAMME. DE 23 06 342, 1973
- /P4/ Bouchet G.: Boiler fuelled by vegetable oil has coiled tube in base of firebox to superheat oil for easier vaporisation. FR 2803905 A1, 2001
- /P5/ BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH: Gasbrenner für flüssigen Brennstoff. DE 103 42 763 A1, 2003
- /P6/ Wünning J.: Verfahren und Vorrichtung zum Verbrennen von Brennstoffen in einem Verbrennungsraum. EP 0463218 A1, 1990
- /P7/ Wünning J.: Industriebrenner mit geringer NOx-Emission. EP 0685683 A2, 1995
- /P8/ OWI Oel-Waerme-Institut gGmbH: Verfahren und Vorrichtung eines Oberflächenbrenners zur Reduzierung der Schadstoffemissionen, DE102008055981A1, 2010
- /P9/ Sintermetallwerk Krebsöge GmbH: Verfahren zum Vernebeln einer Flüssigkeit und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens, , DE000003921254A1 , 1991
- /P10/ Herrmann, S.: Verfahren zum Erzeugen eines brennbaren Gemisches aus einem flüssigen Brennstoff und Verbrennungsluft in einem Brenner sowie Brenner zum Durchführen des Verfahrens, DE000019606560C2, 1998
- /P11/ Herrmann, S.: Vorverdampfender und vormischender Brenner für flüssige Brennstoffe, DE000019606560A1, 1997
- /P12/ Joh. Vaillant GmbH u. Co: Verfahren zur Minimierung der Bildung thermischer Stickoxide bei einer Verbrennung, DE000004435028A1, 1995

1.8 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Projektpartner siehe Pkt. 1.1 "Projektdateien"

Besprechungen

Die Zusammenarbeit zwischen den vier Projektpartnern wurde getragen durch Projekt-Statusseminare, die in mindestens halbjährlichen Abständen stattfanden und durch Protokolle dokumentiert wurden. Zusätzlich wurden zu konkreten Themen und Ereignissen bilaterale Treffen und Telefonkonferenzen durchgeführt. Das Kernteam des Projektes führte einmal wöchentlich eine Besprechung durch, deren Inhalte durch Protokolle dokumentiert sind.

Es fanden folgende Meetings / Statusseminare statt:

11./12.12.2012: Kick-Off Meeting der Projektpartner bei der Fa. Herrmann in Waiblingen (Fa. Solvis und TU Braunschweig nahmen nicht teil)

07.06.2013: 1. Statusseminar zwischen Fa. Herrmann, Fa. Solvis, TU Braunschweig und Ostfalia anlässlich der Unterzeichnung der Kooperationsvereinbarung in Wolfenbüttel.

06./07.11.2013: 2. Statusseminar zwischen Fa. Herrmann und Ostfalia in Waiblingen (Fa. Solvis und TU Braunschweig nahmen nicht teil).

09.12.2013: Fortsetzung des 2. Statusseminars zwischen Fa. Solvis, TU Braunschweig und Ostfalia in Wolfenbüttel (Fa. Herrmann nahm nicht teil).

29./30.07.2014: 3. Statusseminar zwischen Fa. Herrmann und Ostfalia in Waiblingen (Fa. Solvis und TU Braunschweig nahmen nicht teil).

Die von den Projektpartnern erzielten Ergebnisse, wichtige Quellen und Dokumente wurden von der Ostfalia mittels der Projektmanagementsoftware "Alfresco" gesammelt, verwaltet und abgelegt und somit für jeden Projektpartner über das Internet zugänglich gemacht.

2 Erzielte Ergebnisse

2.1 Untersuchungen am modifizierten Blaubrenner

Für den Anfahrbetrieb des Ölbrenners wird ein so genannter Blaubrenner der Firma Herrmann mit einer zweistufigen Feuerungsleistung von 10- 18 kW als Primärbrenner HLZ 45 /F43/ verwendet.

Ziel der Untersuchungen ist es, ein steuerungsfähiges Programm für eine speicherprogrammierbare Steuerung des modifizierten Blaubrenners zu entwerfen und mit Hilfe von Messungen zu validieren.

Der neuartige Brenner hat einen Leistungsbereich von 10-18 kW; dies ist eine Leistung wie sie im Haushaltsbereich üblicherweise zur Verfügung steht. Bei diesem neuartigen Brenner-typ werden die Verbrennung und die Verdampfung nicht wie bei herkömmlichen Ölbrennern miteinander verknüpft, sondern apparativ voneinander entkoppelt.

Ausgangslage war, dass die einzelnen Brennerstufen sowie das An- und Abfahren des Brenners bisher von Hand angesteuert wurden. Bisher wurden keine Steuerungs- und Regelungsstrategien für eine Stickoxidminimierung als Primärmaßnahme eingesetzt. Diese Lücke galt es zu schließen. Zur Umsetzung dieser Strategie wird eine SPS der Firma Wago genutzt. Die Entwicklungsumgebung ist das Programm "CoDeSys V2.3", wobei die Wago die Steuereinheit ist, auf der die Programme für die Steuerung/Regelung gespeichert werden.

Aus dem Vorgängerprojekt war bekannt, dass zur Realisierung eines flammenabrissfreien Betriebes gewisse Anlagenkomponenten angesteuert bzw. geregelt werden müssen. Dazu zählen:

- die Menge des eingespeisten Sekundärbrennstoffes,
- die Luftzufuhr in den Brennraum und
- die Öffnung des Rezirkulationsspalt

Dabei wird die Menge des eingespeisten Sekundärbrennstoffes anfangs durch ein ansteuerbares Nadelventil eingestellt. Die Luftzufuhr erfolgt durch den am Brenner integrierten Ventilator, dessen Förderleistung durch Pulsweitenmodulation angepasst wird. Hierzu war ein Eingriff in die originäre Brennersteuerung erforderlich. Das Auf- und Zufahren des Rezirkulationsspalt wird durch einen Schrittmotor realisiert.

2.1.1 Bauliche Maßnahmen

Zur Umsetzung der oben genannten Maßnahmen sind Modifikationen am Ölbrenner des Kooperationspartners erforderlich. Diese sollen den bis dato handgeführten Brennerbetrieb automatisieren.

2.1.1.1 *Integration eines Schrittmotors*

Für den Schrittmotor, der den Rezirkulationsspalt öffnet und schließt, wird eine Halterung gebaut. Handelsübliche Schrittmotoren, die das erforderliche Drehmoment besitzen, um die vorhandene manuelle Spaltweitenjustierung zu bewegen, sind vergleichsweise groß, so dass bei der Anbindung auf die notwendige Stabilität geachtet werden muss. Weiterhin war zu beachten, dass bestehende Anschlüsse z.B. für den Flammenwächter weiterhin zugänglich bleiben. Zusätzlich wird ein Taster an dem Rezirkulationsspalt befestigt, der als Endlagenschalter dient, wenn der Rezirkulationsspalt 2 mm weit geöffnet ist.

Im nachfolgenden Bild ist die Ankopplung des Schrittmotors an den Brenner dargestellt.

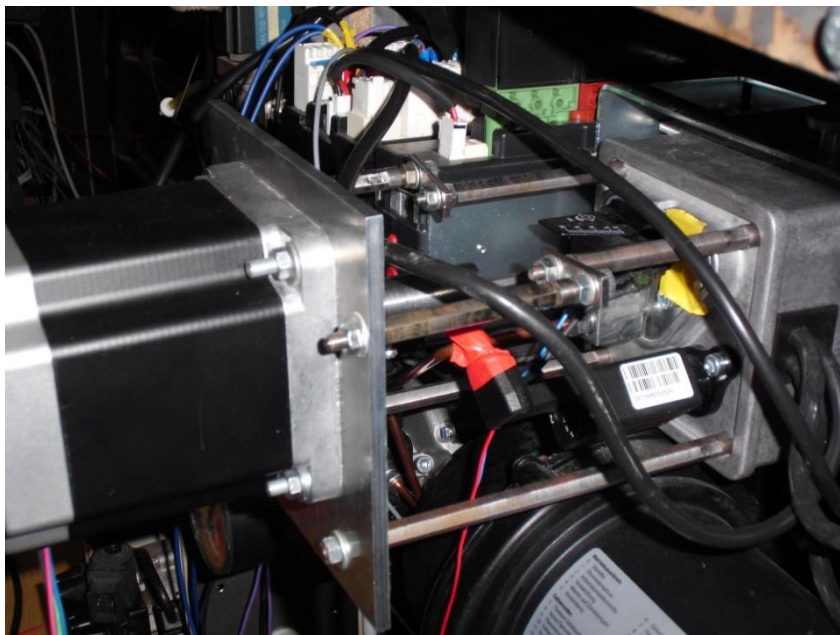


Bild 9: Schrittmotorankopplung an den Brenner

2.1.1.2 *Austausch des Flammenwächters*

Mit einem Flammenwächter soll die Ausbildung der Flamme überwacht werden. Es werden hierfür Fotodioden verwendet, deren Signal verstärkt wird. Während der ersten Versuche wird festgestellt, dass der vom Kooperationspartner verbaute Flammenwächter (BST Solutions KLC 2002) bereits abschaltet, obwohl eine Flamme nachweislich noch vorhanden ist. Ursache hierfür ist in den Schwellenwerten der „Flackerfrequenz“ des BST Solutions KLC 2002 begründet, die im Bereich von 15-52 Hz liegen /F46/. Daher wird auf den Flammenwächter des Vorgängerprojektes (Satronic IRD 1010.1) zurückgegriffen. Dieser besitzt mit

15-250 Hz einen größeren Frequenzbereich /F47/. Durch diese Maßnahme ist es möglich, den Rezirkulationsspalt weiter zu öffnen als mit dem der Fa. BST Solutions.

Um das Signal des Flammenwächters im späteren Verlauf des Projektes auf die „Wago“ zu übertragen, wird ein Optokoppler installiert, da der Flammenwächter als Ausgangssignal eine sehr geringe Spannung bei einer hohen Stromstärke liefert. In einem Optokoppler wird das Signal zwischen zwei getrennten Stromkreisen mit Hilfe einer Leuchtdiode als Sender und einem Fototransistor als Empfänger übertragen /F48/. An der Wago kann nun das Flammensignal im benötigten Spannungsintervall gemessen und überwacht werden.

2.1.1.3 Integration eines regelbaren Ventils für den Sekundärkreis des Brennstoffes

Über das Nadelventil im Sekundärkreis lässt sich die Ölzufuhr zur Verdampferspirale einstellen. Das Volumen des zugeführten Öls ist dabei abhängig vom Öffnungsgrad des Ventils. Je weiter sich dieses öffnet, desto mehr Öl gelangt in die Verdampferspirale und somit in den Brennraum.

2.1.1.4 Einbau eines Durchflussmessers

Im weiteren Projektverlauf werden dem Brennerversuchsstand verschiedene Tageslastgangprofile aufgeprägt. Als Wärmeabnehmer dient hierbei ein Kühlkreislauf. Über den Volumenstrom des Kühlmittels (Wasser) lässt sich der übertragene Wärmestrom einstellen bzw. berechnen. Hierzu ist es erforderlich den Durchfluss des Wassers im Kältekreis der Anlage messtechnisch zu erfassen. Zu diesem Zweck wird ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät (MID) der Firma Krohne /F49/ in den Kühlmittelkreis eingebaut. Der Messumformer des magnetisch-induktiven Durchfluss-Messgerätes liefert zwischen den Klemmen A und A+ einen geringen Strom. Dieses Signal wird mit Hilfe eines 500 Ω Widerstandes an die Speicherprogrammierte Steuerung (Wago) übergeben, damit das Regelungsprogramm der CoDeSys (siehe Kapitel 2.2.1) auf die einzelnen Lasten reagieren kann.

2.1.2 Begleitende Simulationen

2.1.2.1 Kalt durchströmte Brennkammer

Die Brennergeometrie wurde von Firma Herrmann, die Geometrie der Brennkammer von Firma Solvis bereitgestellt. Die Geometrien wurden zusammengefügt und mit einem automatischen Netzgenerator hexaedrisch vernetzt (siehe Bild 10).

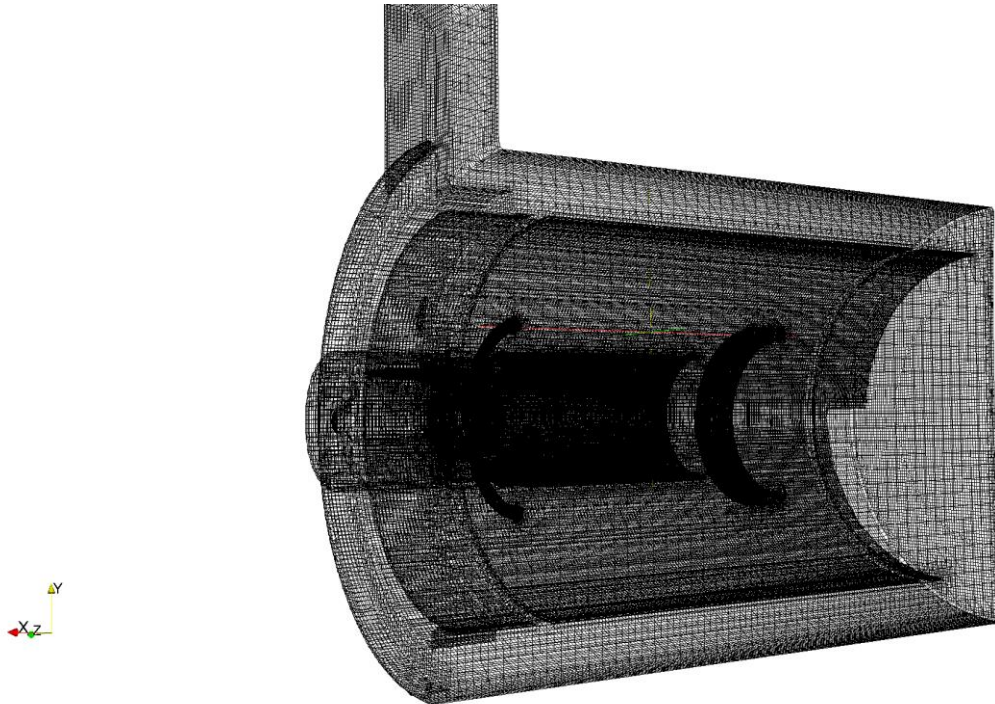


Bild 10: Hexaedrisch vernetzte Geometrie im Halbschnitt

Zunächst wird als Grundlage für weitere Berechnungen die kalte Durchströmung der Brennkammer simuliert. Hierfür wird der Luftvolumenstrom des Versuchsbrenners in der Brennerstufe 1 (10 kW) ermittelt und dem Modell am Einlass aufgeprägt; gleichzeitig wird der Druck am Auslass vorgegeben. Der stationäre Löser berechnet daraus die Geschwindigkeits- und Druckverteilung in der Fluiddomäne (siehe Bild 11).

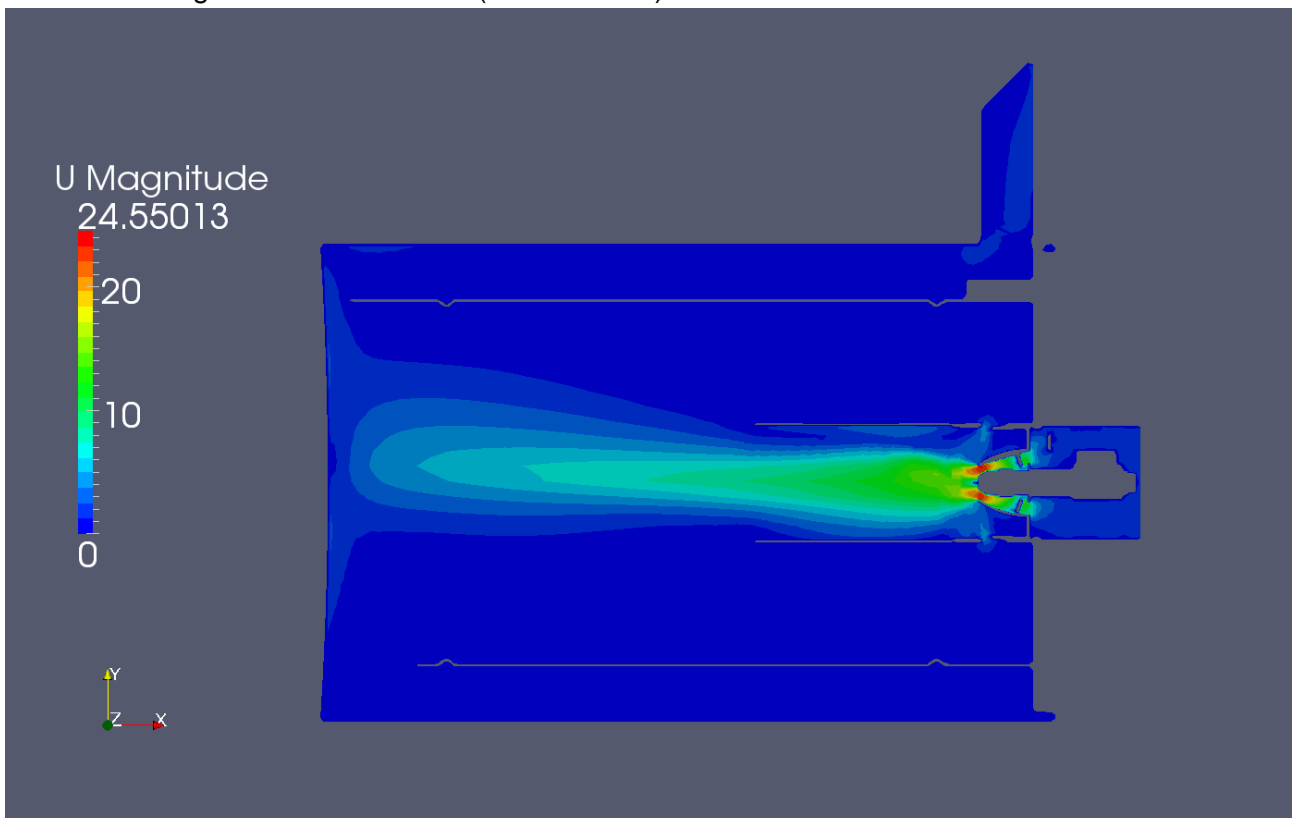


Bild 11: Geschwindigkeitsprofil in der kaldurchströmten Brennkammer

2.1.2.2 Auswahl des Solvers und initiale Simulation

Um einen Ölbrenner zu simulieren, ist zu berücksichtigen, dass das Öl zunächst flüssig als Heizölspray vorliegt und anschließend verdampft. In diesem speziellen Fall wird aber zusätzlich gasförmiges Heizöl über die Verdampferspirale in den Brennraum eingebracht. Die Verbrennung erfolgt mit sichtbarer Flamme, wobei diese Brennertechnologie am Übergang zur flammlosen Verbrennung liegt.

Zur Lösung der Problemstellung werden verschiedene Techniken eingesetzt, die alle in den Löser (Solver) zu implementieren sind.

Der Ölspray des Primärbrenners wird durch sogenannte Lagrangepartikel dargestellt, die Darstellung von gasförmigem Brennstoff (Sekundärbrenner) ist hierbei unproblematisch.

Die verwendete Chemie wird mit dem Eddy-Dissipation-Concept (EDC-Modell) berechnet. Grundlage des EDC-Modells ist die Annahme, dass die Reaktionen ausschließlich in feinen Wirbelstrukturen (Eddies) stattfinden. Die Reaktionen werden in einem gesonderten Simulationsschritt berechnet. Zunächst wird eine schnelle chemische Kinetik (mixed-is-burnt) verwendet, später wird ein genauerer Mechanismus (Rührkesselreaktor) eingeschaltet, um die Ergebnisse zu verbessern.

Die Verbrennung erfolgt nur in Form einer Reaktion, ein mehrstufiger Reaktionsmechanismus wird nicht umgesetzt. Die Reaktionen für die Schadstoffbildung (NO_x) können gesondert zugeschaltet werden.

Zunächst wird die initiale Flammformation unter den Bedingungen einer adiabaten Brennkammer als Grundlage weiterer Simulationen simuliert (Bild 12).

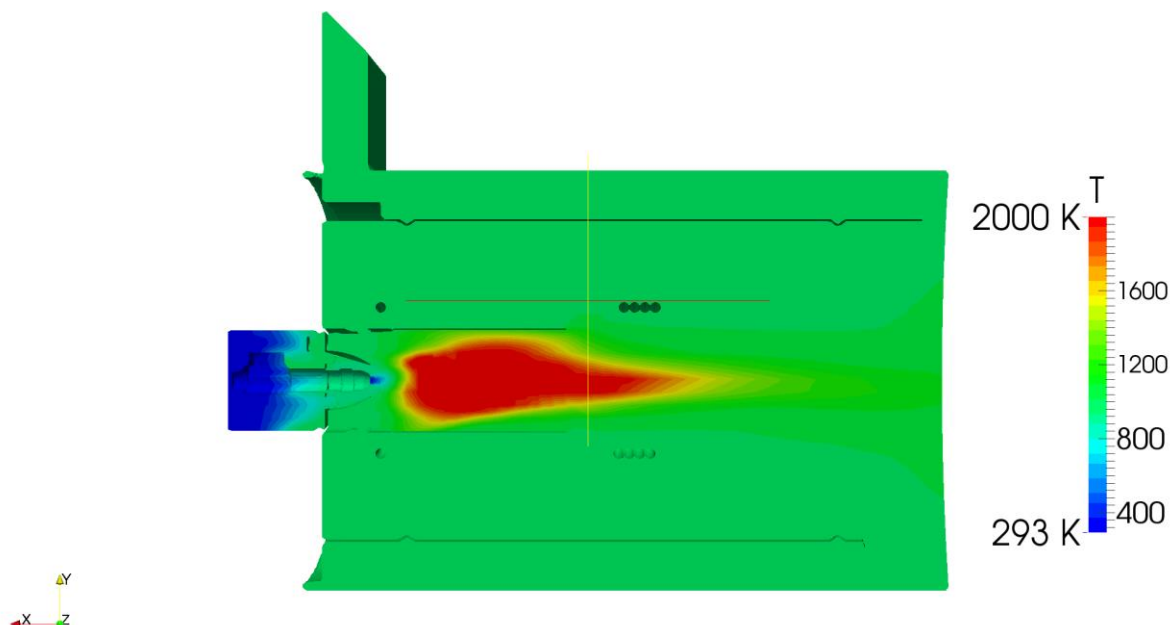


Bild 12: Temperaturverteilung in der adiabaten Brennkammer (Schnitt in axialer Richtung) nach initialer Flammenbildung

Durch die schnelle chemische Kinetik und das einfache Reaktionsschema kommt es in der Flamme zu sehr hohen Temperaturen (≥ 2.000 K) in der Simulation der adiabaten Brennkammer. Dieses entspricht den Erwartungen gemäß den Abschätzungen zur adiabaten Flammentemperatur (ca. 2.000 K), deckt sich aber nicht mit den experimentellen Befunden, die man in einer nicht-adiabaten Brennkammer vorfindet.

2.1.2.3 Vereinfachungen im Simulationsmodell

Durch die Einbindung der oben genannten Lagrange-Partikel kann kein stationärer Löser verwendet werden. Diese Art der Betrachtung erfordert einen transienten (zeitabhängigen) Lösungsalgorithmus. Angesichts des notwendigen Rechenaufwandes von mehreren Wochen auf den lokal verfügbaren Rechnern wird das Rechenmodell vereinfacht und angepasst.

Das Öl für die Stützfeuerung wird bereits gasförmig in den Brennraum eingebracht, das chemische Modell wird dabei nicht verändert.

Zusätzlich werden verschiedene Randbedingungen für die Temperatur an der Kesselaußenwand getestet, um die entstehende Wärme abzuführen. Die Aufprägung eines Wärmeflusses auf die Außenfläche hat jedoch lokale Temperaturunterschreitungen zur Folge, welche die Simulation instabil werden lassen. Zugunsten der Stabilität wird daher eine feste Temperatur (60 °C) auf die Kesselaußenwand aufgeprägt, wodurch die Energiebilanz der Simulation von den experimentellen Ergebnissen deutlich abweicht. Der so simulierte stationäre Zustand liefert eine Temperaturverteilung auf deutlich zu niedrigem Niveau (Bild 13), was durch die experimentell bestimmten Temperaturen an der Verdampferspirale und am Rezirkulationspalt bestätigt wird.

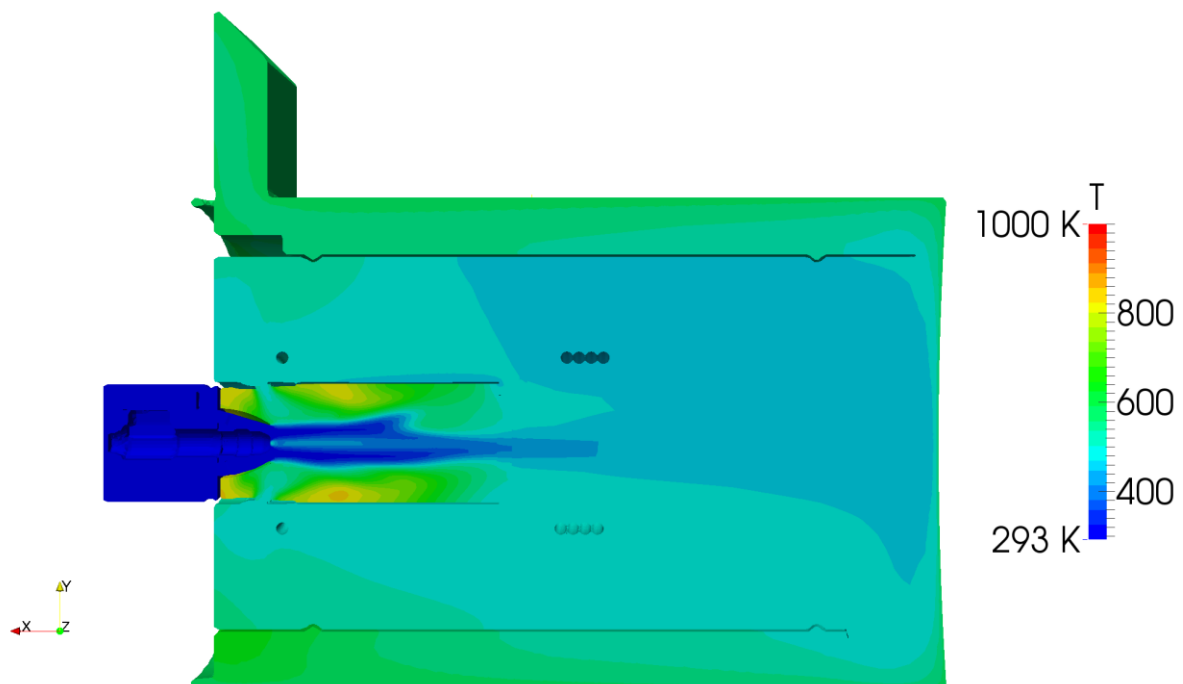


Bild 13: Temperaturverteilung in der nicht-adiabaten Brennkammer mit vereinfachten Randbedingungen im stationären Zustand

Darüber hinaus weichen die simulierte Flammenform (Bild 14) und Temperaturverteilung im Rezirkulationsrohr (s. Bild 13) deutlich von den Beobachtungen ab.

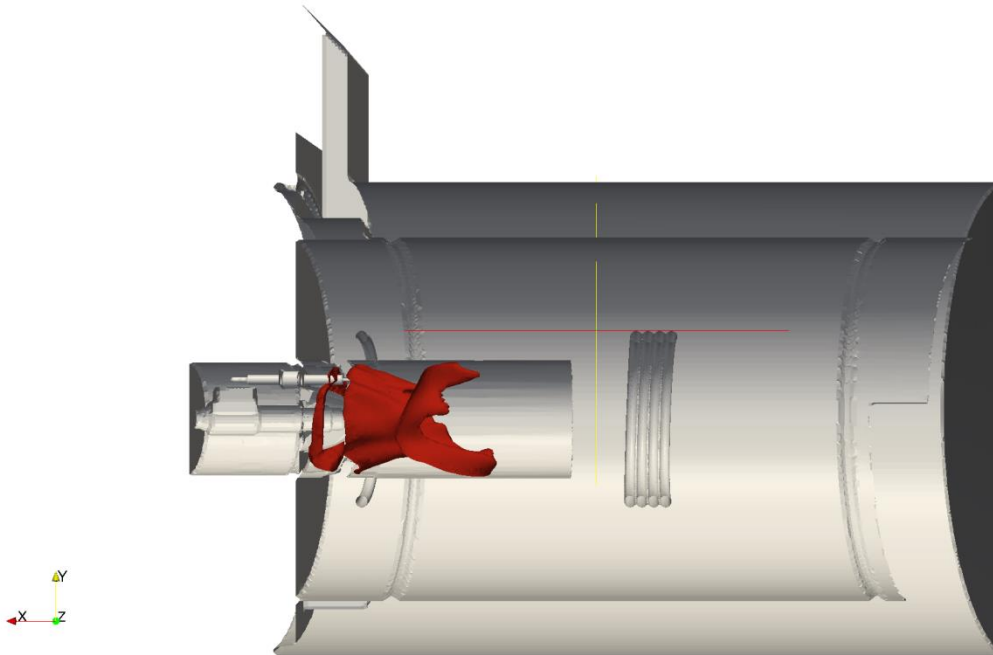


Bild 14: Flammenform (Isothermenfläche) bei stationärer Simulation

Entsprechend liefert die Zuschaltung der schadstoffbildenden Reaktionen keine verwertbaren Ergebnisse, so dass die Grundlage für die Einbindung des Sekundärkreises nicht gegeben ist. Für eine detaillierte Untersuchung der vollständigen Problemstellung mittels Simulation müsste die Ölverdampfung im Spray und in der Verdampferspirale detailliert innerhalb einer Multiphysik-Simulation berechnet werden. Hierfür wird erheblich mehr Rechenkapazität und Zeit benötigt als in diesem Projekt eingeplant ist bzw. zur Verfügung steht, so dass dieser Ansatz nicht weiter verfolgt wird.

2.1.2.4 Optimierung des Rezirkulationsrohres

Bereits im Vorgängerprojekt /F41/ wurde im Versuch mit einer düsenförmigen Querschnittsverengung im Rezirkulationsrohr experimentiert, diese jedoch nicht quantitativ bewertet. Die Fragestellung der Flammrohroptimierung wurde als Teilproblem der begleitenden Simulation festgelegt.

Das daraus resultierende Optimierungsproblem kann wie folgt beschrieben werden:

- Maximierung der durch den Rezirkulationsspalt angesaugten Gasmenge bei gleichbleibendem Treibstrom

Das Problem wird auf einen zweidimensionalen Fall (wedge) reduziert. Die Betrachtung erfolgt stationär. Der Treibstrom am Einlass wird auf einen konstanten Wert festgelegt, die Druckverhältnisse am Auslass und am Rezirkulationsspalt werden vorgegeben.

Ziel der Optimierung ist eine Maximierung, dabei wird der Volumenstrom über den Einlass „Rezirkulationsspalt“ als Zielfunktion gewählt.

Als Entwurfsvariablen werden zwei Punkte auf dem Rand der Geometrie gewählt, die vertikal und horizontal verschoben werden dürfen. Nach ersten Testläufen erwies es sich als sinnvoll, einen der beiden Punkte auf die vertikale Richtung zu beschränken.

Die Optimierung erfolgt mit einem genetischen Algorithmus, die Nebenbedingungen werden zunächst so gesetzt, dass fast alle Geometrien zulässig sind.

Das Ergebnis des ersten Optimierungslaufes ist in Bild 15 dargestellt.

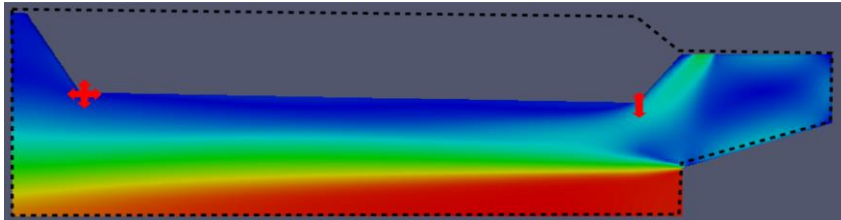


Bild 15: Ergebnis des ersten Optimierungslaufes, Ursprungsgeometrie gestrichelt, verschobene Geometrie und Freiheitsgrade mit roten Markierungen

Durch die Verschiebung des rechten Punktes wird der tote Bereich, der sich direkt am Rezirkulationsspalt bildet, vermieden. Durch die Einschnürung werden Bereiche des ursprünglichen Simulationsgebietes (gestrichelte Linie in Bild 15 und Bild 16) ausgeblendet, welche durch Ablösung der Strömung für Druckverlust sorgen. Der angesaugte Volumenstrom durch den Rezirkulationsspalt konnte verdoppelt werden, jedoch ist die Geometrie so nicht umsetzbar, da durch die tiefe Einschnürung die Zündelektroden nicht mehr in das Rezirkulationsrohr passen und auch die optische Flammenüberwachung nicht mehr ordnungsgemäß arbeiten kann.

Als Folge werden Nebenbedingungen eingefügt, welche vor Allem die Tiefe der Einschnürung begrenzen. Das Ergebnis ist in Bild 16 dargestellt.

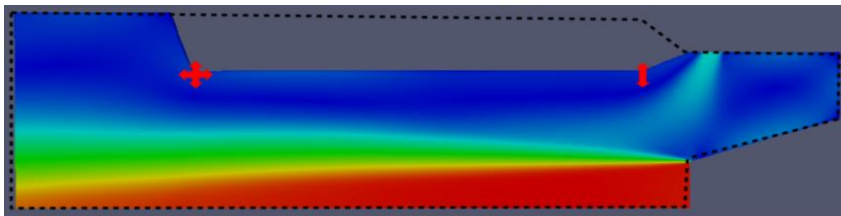


Bild 16: Ergebnis des zweiten Optimierungslaufes mit Nebenbedingungen, Ursprungsgeometrie gestrichelt, verschobene Geometrie und Freiheitsgrade mit roten Markierungen

Die Geometrie dieses Optimums ist dem ersten Optimierungslauf grundsätzlich ähnlich, ist jedoch bautechnisch mit den Sensoren zur Flammenüberwachung kompatibel. Die erreichbare Rezirkulationsrate ist nur um 2,4% geringer als im ersten Optimierungslauf.

Die Lage des linken Geometriepunktes scheint keinen sehr großen Einfluss auf die Optimierung zu haben, da diese sich zwischen den beiden Optimierungsläufen deutlich unterscheidet.

Um eine strömungstechnisch ideale Lösung zu finden, wird mit dem ermittelten maximalen Volumenstrom am Rezirkulationsspalt und dem festgelegten Volumenstrom am Einlass eine Gestaltoptimierung mit einem adjungierten Lösungsverfahren angestoßen.

Der adjungierte-Löser ist in der Lage, die Porosität der Zellen im vorgegebenen Volumen zu verändern und so Zellen von Fluidzellen zum Festkörper umzuwandeln.

Das Ergebnis des adjungierten Verfahrens ist in Bild 17 dargestellt. Die Abbildung zeigt deutlich eine düsenförmige Einschnürung und eine Ausblendung von strömungstechnisch toten Bereichen.

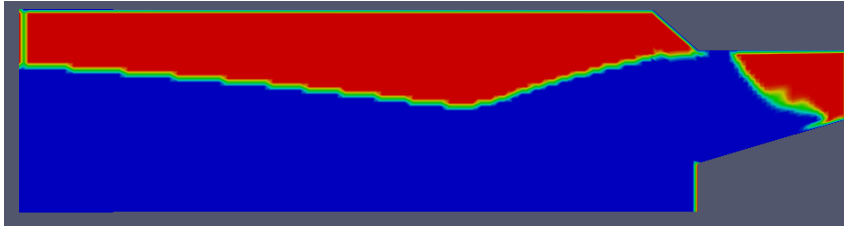


Bild 17: Ergebnis des adjungierten Verfahrens, nur der blaue Bereich gehört noch zum Fluid, rote Bereiche sind für das Fluid nicht durchdringbar

Das ermittelte Design wurde an die Verhältnisse des Versuchstandes angepasst und von der zentralen Betriebswerkstatt gefertigt.



Bild 18: Formoptimiertes Flammenrohr mit düsenförmiger Einschnürung

Im Betrieb wirkt sich das neue Flammenrohr (Bild 18) bei kleinen Leistungen positiv auf die Flammenstabilität aus, neigt allerdings bei höheren Leistungen verstärkt zu Instabilitäten. Darüber hinaus führte diese Maßnahme zu keiner weiteren Reduzierung der Abgasemissionen.

2.1.3 Ermittlung der optimalen Brennerkonfiguration

Zur Ermittlung der optimalen Brennerkonfiguration werden während der Messungen bestimmte Bauteile des Brenners ausgetauscht. Hierzu zählen:

- die Öldüsen
- das Flammenrohr
- die Verbrennungsluftdüsen mit unterschiedlichen Drallwinkeln

Der Öldurchsatz, der in USgal/h (US-Gallonen pro Stunde) angegeben wird, ist für die Menge des Öls, das verbrannt wird, maßgeblich. Dabei entspricht eine USgal/h etwa einem Durchsatz von 3,8 Liter/h. Zum Einsatz kommen hierbei Öldüsen der Größe 0,2 und 0,3 USgal/h mit Sprühwinkel zwischen 45° und 80°. Der Winkel einer Öldüse beeinflusst maßgeblich die Größe der sich aufspannenden Kegelmantelfläche in der sich die Öltröpfchen verteilen, verdampfen und anschließend verbrennen. Je kleiner der Winkel ist, umso schlanker ist die sich ausbildende Flammenform.

Da die Größe des Flammrohrs die Verbrennungszone und damit das Emissionsverhalten des Brenners maßgeblich beeinflusst, wurden zur Ermittlung der optimalen Konfiguration Flammenrohre mit einem Durchmesser von 80 mm und 100 mm eingesetzt. Dabei ist anzumerken, dass der Brenner des Kooperationspartners Fa. Herrmann im Auslieferungszustand über ein 80mm-Flammrohr verfügt.

Am Austritt des Luftkanals angebrachte Drallschaukeln versetzen die Verbrennungsluft in eine Rotationsbewegung (Drall), so dass sich das zerstäubte Öl und die Verbrennungsluft sehr intensiv vermischen. Im Rahmen der durchgeführten Messungen werden Drallwinkel von 24° und 47° verwendet. Bild 19 zeigt einen Drallkörper mit einem Drallwinkel von 24°.

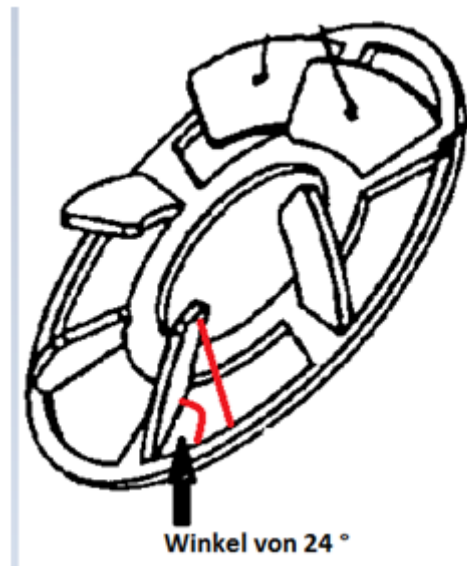


Bild 19: Drallkörper mit einem Drallwinkel von 24°

2.1.3.1 Messung des Druckverlustes über der Verdampferspirale

Bei den ersten Messungen mit dem Brenner des Kooperationspartners ist aufgefallen, dass O₂- und CO₂-Werte im Abgas bei vorgegebenem Ölmassenstrom im Sekundärkreis zeitlich nicht konstant sind und sich somit eine Driftproblematik einstellt. Während der O₂-Wert mit der Zeit ansteigt, verringert sich gegenläufig dazu der CO₂-Wert. Eine Druckmessung am Eintritt der Verdampferspirale soll einen Hinweis liefern, ob sich in der Verdampferspirale als Nebenprodukt der Ölverdampfung Koks bildet und an der Innenwand abscheidet, welches eine Querschnittsverengung und damit einen erhöhten Druckverlust herbeiführt. Verwendet wird hierfür ein U-Rohrmanometer, welches über ein Dreiwegeventil (Position hinter dem regelbaren Nadelventil) mit dem Sekundärkreis verbunden wurde.

Bei dieser Messung wird folgende Konfiguration verwendet:

- Öldüse: 0,3 USgal/h
- Sprühwinkel: 80°
- Flammenrohr: 100 mm
- Drallwinkel: 24°
- Rezirkulationsspalt: 5mm (konstant)

In Bild 20 ist der zeitliche Verlauf des Druckverlustes über der Verdampferspirale dargestellt. Im Intervall 0 bis 7 Minuten befindet sich noch flüssiges Öl im hinteren Teil der Verdampfer-

spirale, so dass verursacht durch die höhere Dichte der flüssigen Phase ein höherer Druckverlust die Folge ist. Mit dem Verdampfen des Öls in diesem Teil der Spirale fällt der Druckverlust etwas ab. Deutlich zu erkennen ist ein Anstieg des Druckes im Zeitintervall 7 bis 120 Minuten. Dieses ist mit der zunehmenden Verkokung der Verdampferspirale und der damit einhergehenden Erhöhung des Strömungswiderstandes zu erklären. Zum Zeitpunkt $t = 120$ Minuten setzt ein Spülvorgang mit Druckluft ein, so dass ein steiler Abfall des Druckverlustes zu beobachten ist. In dieser Zeit erfolgt eine Erhitzung der Verdampferspirale über den Primärbrenner.

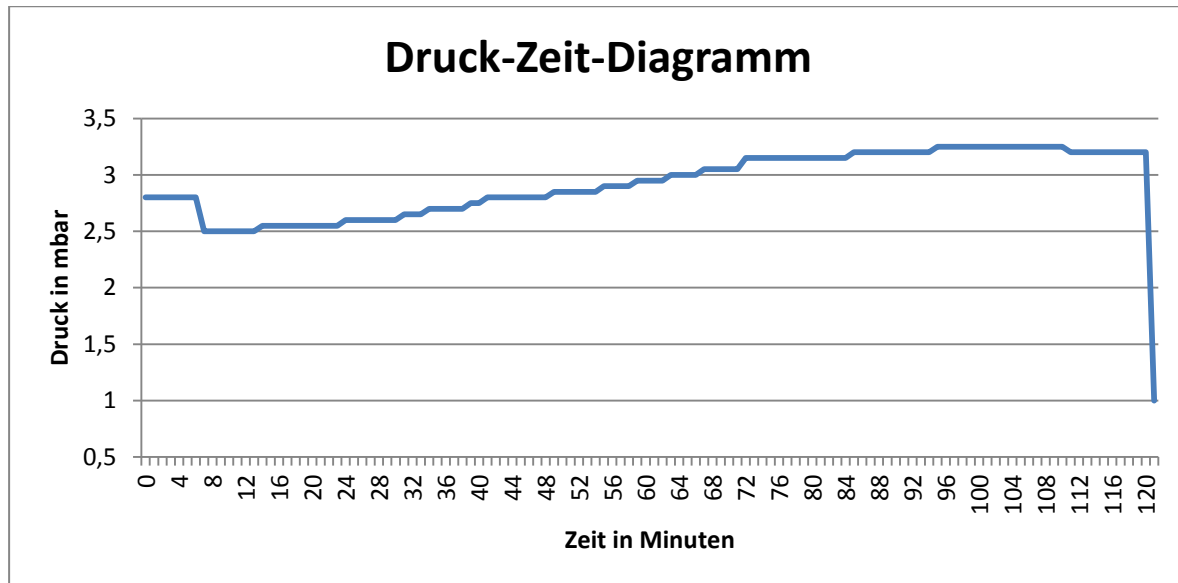


Bild 20: Zeitliche Änderung des Druckverlustes über der Verdampferspirale

Eine Spülung mit Druckluft erweist sich somit als nützlich, da die Verdampferspirale auf diese Weise von Koksrückständen befreit wird und das geförderte Öl somit besser in den Brennraum gelangt. Die Zunahme der Druckdifferenz über der Verdampferspirale bedingt eine Abnahme des Ölmassenstroms im Sekundärkreis. Sichtbar wird dieses auch an den Abgaswerten für O_2 und CO_2 . Den zeitlichen Verlauf des CO_2 -Gehaltes (Drift) im Abgas für zwei verschiedene Nadelventileinstellungen zeigt Bild 21.

Für diese Messung wurden die 0,3 USgal/h Düse mit Sprühwinkel von 80° , ein 80er Flammenrohr und ein Drallwinkel von 24° verwendet.

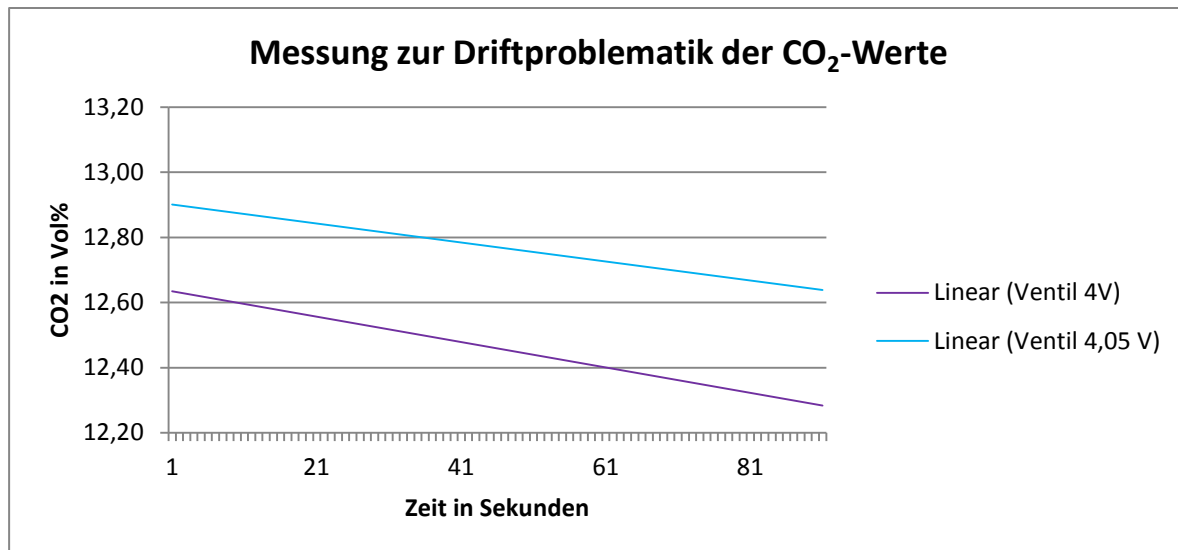


Bild 21: Drift der CO₂-Werte im Abgas durch Verkokung der Verdampferspirale

Die vorgenannten Ergebnisse belegen, dass in der Verdampferspirale eine Verkokung stattfindet. In der Programmierung der Steuerung für den vollautomatischen Betrieb muss demzufolge ein Spülvorgang des Sekundärkreises implementiert werden.

2.1.3.2 Emissionsmessungen bei verschiedenen Brennerkonfigurationen

In der folgenden Tabelle sind die Emissionswerte für NO_x und CO gemäß DIN EN 267 (Bezugssauerstoffgehalt: 3 Vol.-%) bei unterschiedlichen Konfigurationen, bei denen eine stabile Verbrennung erzielt werden kann, bezüglich Öldurchsatz, Sprühwinkel, Einsatz von Sekundärlufttröhrchen, Flammrohrdurchmesser und Flammenwächtertyp dargestellt. Darüber hinaus sind der realisierbare Leistungsbereich sowie der korrespondierende Bereich der Rezirkulationsspaltweiten angegeben. Hierbei ist anzumerken, dass mit steigender Brennerleistung auch bei größeren Rezirkulationsspaltweiten eine stabile Verbrennung erreicht werden kann.

Die Messergebnisse mit der 0,3 USgal/h Düse (Versuch-Nr. 1 und 2) zeigen, dass der angestrebte NO_x-Emissionswert von 50 mg/kWh deutlich überschritten wird. Der Sauerstoffgehalt im Abgas lag bei diesen Versuchen zwischen 5-6 Vol.-%.

Vers.-Nr.	Öldüse in USgal/h	Sprühwinkel	Sek.-luft-röhrchen	Durchm. Flammrohr in mm	Typ Flammenwächter	Rezirk.-spaltweiten in mm	Gesamtleistung in kW	NO _x in mg/kWh	CO in mg/kWh
1	0,3	80°	-	80	BST	6 - 14	k.A.	> 70	k.A.
2	0,3	80°	-	100	BST	4 - 8	5 - 13	> 62	k.A.
3	0,2	45°	-	80	BST	3 - 6	6 - 15	> 35	330-1050
4	0,2	60°	x	80	BST	3 - 5	8 - 9,5	40 - 52	770-1100
5	0,2	60°	x	100	BST	4 - 7	7 - 11	45 - 70	k.A.
6	0,2	60°	x	100	Satronc	4 - 10	8 - 14	45 - 65	40 - 270

Tabelle 3: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse bei unterschiedlichen Brennerkonfigurationen

Deutlich bessere Stickoxidwerte lassen sich mit der 0,2 USgal/h Düse (Versuch-Nr. 3 bis 6) erzielen. Hierbei erweist sich ein Sprühwinkel von 60° und ein Flammrohrdurchmesser von 100 mm als besonders vorteilhaft. Als Maßnahme zur Stabilisierung der Flamme werden, wie auch schon im Vorgängerprojekt, sogenannte Sekundärluftfröhrchen eingebaut, diese ermöglichen eine Erweiterung des Leistungsbereiches, ohne dass die Flamme instabil wird oder abreißt. Eine Erhöhung des Drallwinkels (von 24° auf 47°) in der Primärluftzufuhr hat insgesamt zu einer Destabilisierung der Flamme geführt. Auf die Problematik des Flammenwächtertyps wurde bereits in Kap. 2.1.1.2 hingewiesen.

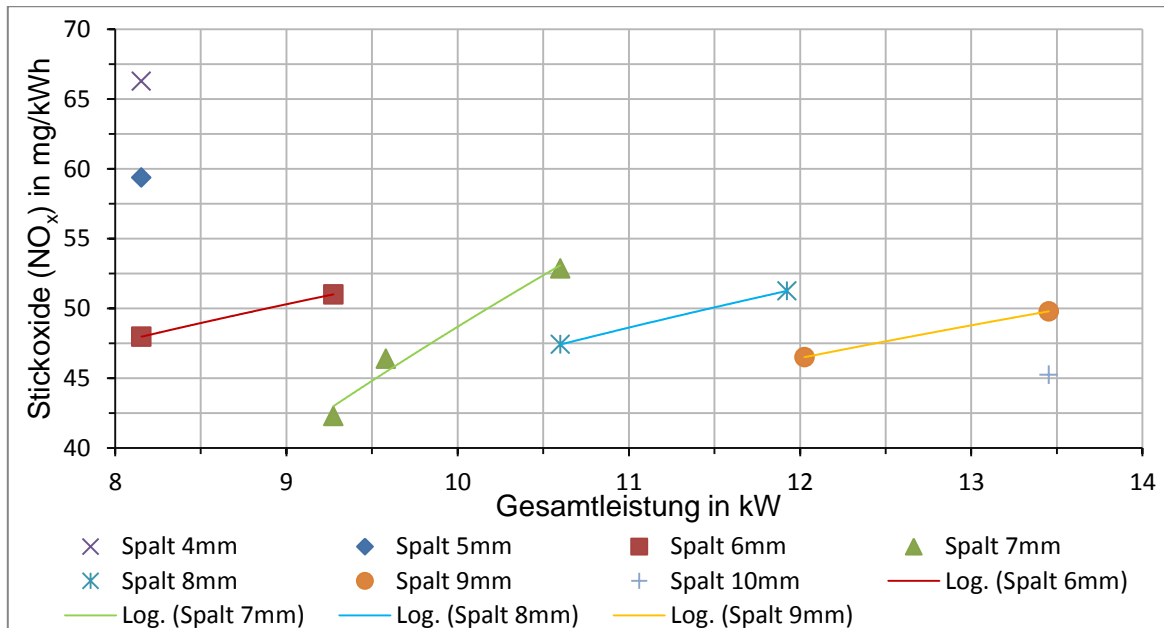


Bild 22: NO_x-Werte für 100er Flammenrohr 0,2USgal/h 60° Düse, Drallwinkel 24° und Sekundärluftfröhrchen

Mit dem Austausch des Flammenwächters kann der Rezirkulationsspalt weiter geöffnet werden, ohne dass es trotz erkennbarer Flamme frühzeitig zu einem Flammenabriss kommt, der Gesamtleistungsbereich wird hierdurch erweitert.

Abweichend von der bisherigen Versuchsdurchführung, bei der die Rezirkulationsspaltweite konstant gehalten wird, wird in dieser Messreihe, ausgehend von einer Gesamtleistung von ca. 8 kW und einer Rezirkulationsspaltweite von 4 mm, die Spaltweite zunächst auf 5 mm und dann auf 6 mm erhöht. Bereits durch diese Maßnahme sinken die Stickoxidemissionswerte auf unter 50mg/kWh. Bei dieser Spaltweite folgt eine Leistungserhöhung auf 9,3kW, was mit einer leichten Erhöhung des Stickoxidwertes auf 51mg/kWh einhergeht. Weitere schrittweise Erhöhungen der Spaltweite ermöglichen eine Erhöhung der Gesamtleistung. Die Kombination aus Erhöhung der Gesamtleistung und der Rezirkulationsspaltweite erfolgt unter dem Primat, einen NO_x-Emissionswert von 50 mg/kWh (angestrebtes Projektziel) nicht zu überschreiten. Hierdurch lässt sich die in den vorangegangenen Versuchsreihen gewonnene Erkenntnis umsetzen, dass die wirksamste Methode, den NO_x-Emissionswert zu reduzieren, die Erweiterung des Rezirkulationsspaltess darstellt. Große Rezirkulationsspaltweiten sind aus Gründen der Flammenstabilität jedoch nur bei entsprechend großen Gesamtleistungen realisierbar. Daraus resultiert der in Bild 22 zu beobachtende sägezahnförmige Verlauf, der die Grundlage für den vollautomatischen Brennerbetrieb bildet. Der Sauerstoffgehalt im Abgas wurde bei diesen Versuchen auf einen Wert von ca. 6 Vol.-% eingestellt.

In Bild 23 ist sichtbar, dass die entsprechenden Kohlenmonoxidwerte – mit Ausnahme der Messung bei einer Spaltweite von 7mm und einer Gesamtleistung von 9,3kW – im Bereich zwischen 15ppm und 75ppm [25 und 120]mg/kWh und damit deutlich niedriger als in den vorangegangenen Versuchen liegen.

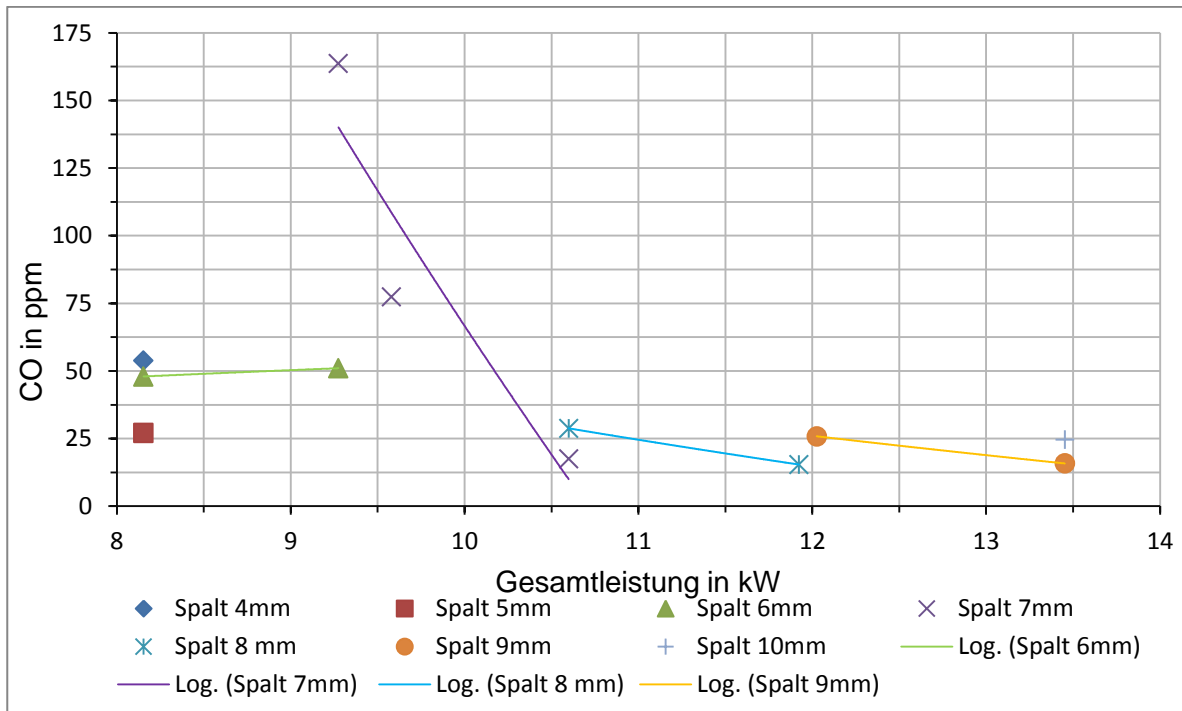


Bild 23: CO-Werte für 100er Flammenrohr 0,2USgal/h 60° Düse, Drallwinkel 24° und Sekundärlufttröhrchen

2.2 Automatisierung des Brennerbetriebes (Blaubrenner)

Bei der Automatisierung des Brenners werden folgende Komponenten in der Regelstrategie vereint:

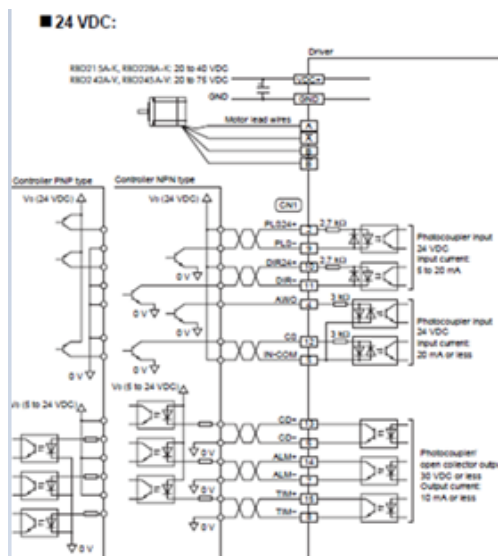
- Der Schrittmotor für die Rezirkulationsspaltweiteneinstellung,
- das Nadelventil im Sekundärkreis und
- das Gebläse für die Verbrennungsluft

Nachfolgend wird auf die Regelstrategie dieser Bauteile für die Programmiersprache CoDe-Sys eingegangen, die nach dem IEC 61131-3 Standard für die Applikationsentwicklung arbeitet. Durch den IEC 61131-3 Standard sind die unterschiedlichen Programmiersprachen an einige einfache Konzepte gebunden. Die geschriebenen Programme werden auf einem SPS-System der Fa. Wago gespeichert.

2.2.1 Automatisierung des Schrittmotors für den Rezirkulationsspalt

Für die Einstellung der Rezirkulationsspaltweite wird ein Zwei-Phasen-Schrittmotor eingesetzt. Ein Schrittmotor besteht aus einem Rotor, der sich in einem festen Stator dreht. Durch unterschiedliche Magnetfelder im Rotor und Stator entsteht ein Drehmoment, welches den Rotor antreibt. Der Unterschied zu anderen Motoren besteht darin, dass sich keine Spulen im Rotor befinden. Diese sind ausschließlich im Stator vorhanden. Um eine Drehrichtung zu erzeugen, werden einzelne Wicklungen ein- und ausgeschaltet. Die Vorteile dieses Motors bestehen darin, dass er ein Haltemoment in Ruhelage und eine genaue Positionierung besitzt /F50/.

Nachfolgend ist der Schaltplan, nach dem der Schrittmotor angeschlossen wird, aus den Herstellerunterlagen aufgeführt.



Pin No.	Signal Name	Beschreibung
2	PLS24+ Input	Impuls-Eingang (24 VDC)
4	AWO Input	Alle Wicklungen Aus Eingang
5	IN-COM	Bezugs Eingang
6	CD- Output	Strom Abwärts Ausgang
7	ALM- Output	Alarm Ausgang
8	TIM- Output	Erregung Zeitsteurausgabe
9	PLS- Input	Impuls Eingang
10	DIR24+ Input	Drehrichtung Eingang (24 VDC)
11	DIR- Input	Drehrichtungs Eingang
12	CS Input	Schritt Winkel Schalteingang
13	CD+ Output	Strom Abwärts-Ausgang
14	ALM+ Output	Alarm Ausgang
15	TIM+ Output	Erregung Zeitsteurausgabe

Bild 24: Schaltplan Motor /F51/

Tabelle 4: Angeschlossene Pins des Motors

Der Schrittmotor soll den Rezirkulationsspalt öffnen und schließen. Um dies zu realisieren, werden nur Pin Nr. 2 und Nr.9 für die rechte Drehrichtung sowie Nr.10 und Nr. 11 für die linke verwendet. In den folgenden Abbildungen ist das Automatisierungskonzept aus der CoDeSys des Schrittmotors abgebildet (siehe Bild 25 bis Bild 29).

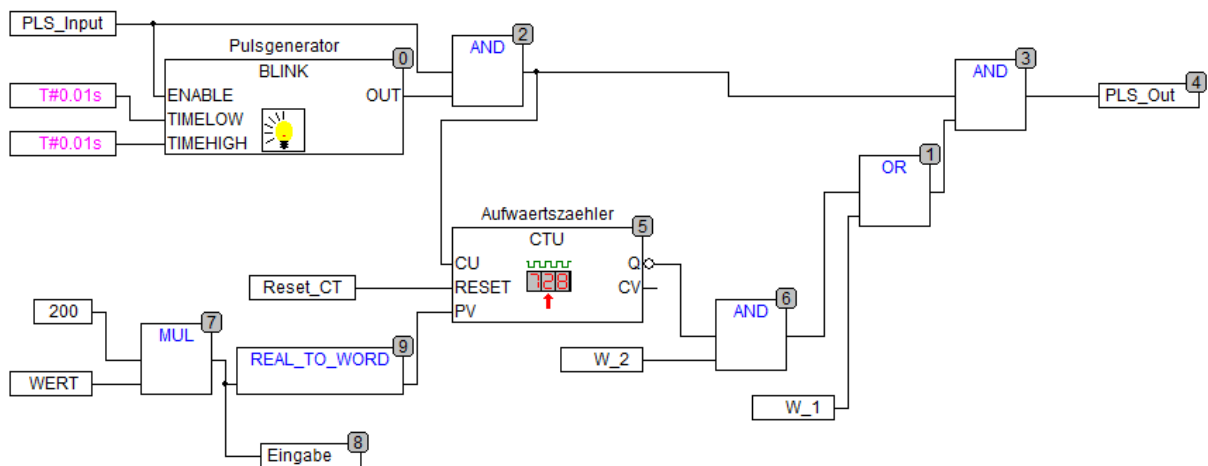


Bild 25: Automatisierung des Schrittmotors

Die in Bild 25 dargestellte Programmierung stellt sicher, dass der Schrittmotor nur die geforderte Anzahl von Drehungen erzeugen wird (Spaltweitenöffnung), jedoch ist deren Richtung noch nicht definiert. Hierzu wird ein Unterprogramm geschrieben (Bild 26).

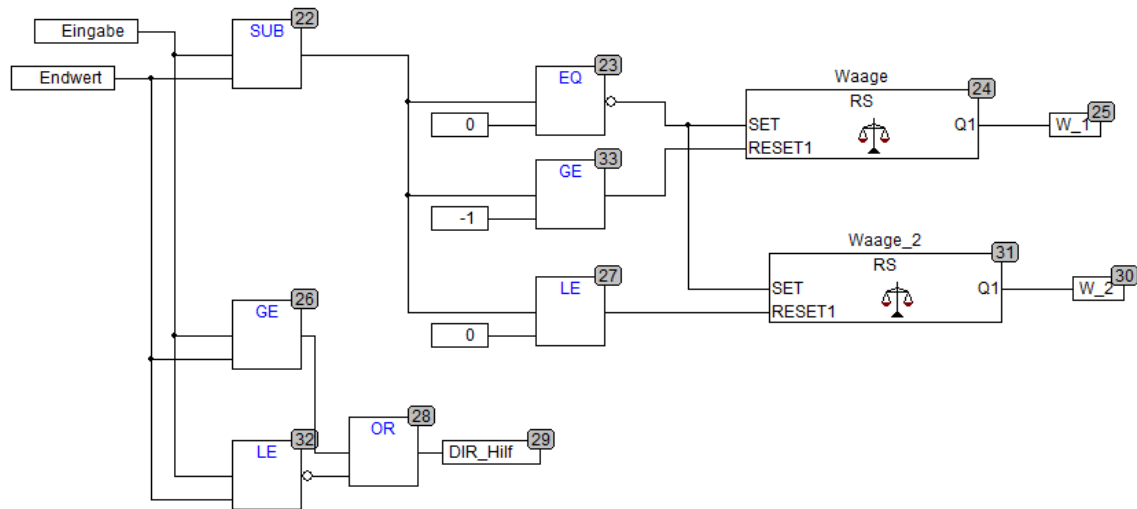


Bild 26: Automatisierung des Schrittmotors Richtungswahl

Die beiden Blöcke mit der Bezeichnung Waage (24) und Waage_2 (31) sind darauf programmiert, dass der Schrittmotor sich nicht zu weit und nicht zu wenig von der eingegebenen Spaltweite, welche im „WERT“ in Bild 25 enthalten ist, einstellt. Nach Durchlauf des Programms hat der Motor die notwendigen Angaben für die Drehrichtung vorgegeben bekommen, somit sind die erforderlichen Eingabewerte für das Programm in Bild 27 definiert.

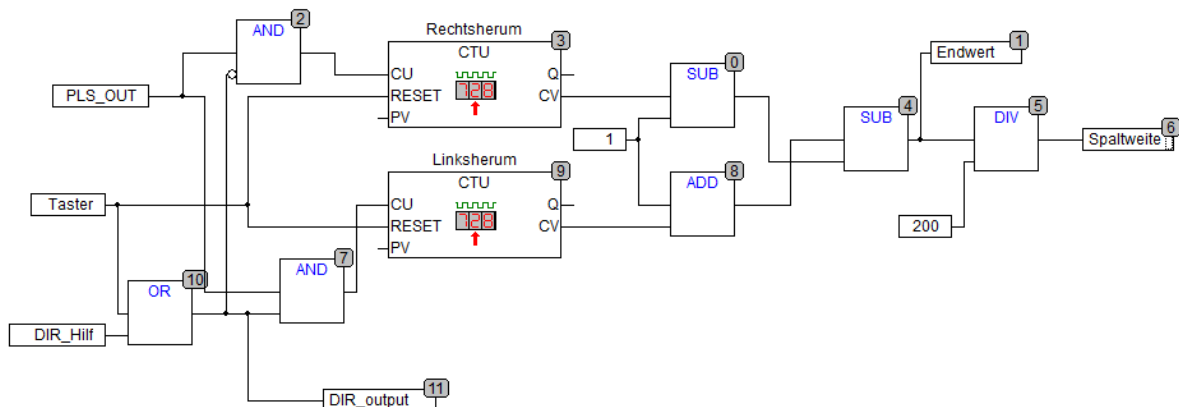


Bild 27: Automatisierung des Schrittmotors Richtungszählung

DIR_Hilf (Bild 27) ist für die Richtung der Umdrehung des Schrittmotors zuständig und ist einer der Ausgänge aus Bild 26. Der Eingang Taster ist ein Signal, das die Steuerung von einem Endlagentaster erhält. Der Taster wechselt von FALSE auf TRUE, wenn der Rezirkulationsspalt geschlossen ist. Dies verhindert ein Weiterdrehen des Motors nach rechts, wenn der Spalt bereits geschlossen ist.

Im folgenden Bild 28 dargestellt ist die Optimierung des Steuerprogramms für den Schrittmotor; dieses hat den Vorteil, dass das Programm kompakter ausgeführt werden kann. Durch diese Verkleinerung ist es CoDeSys möglich, schneller zu arbeiten, da es eine geringere Bit-Zahl verarbeiten muss.

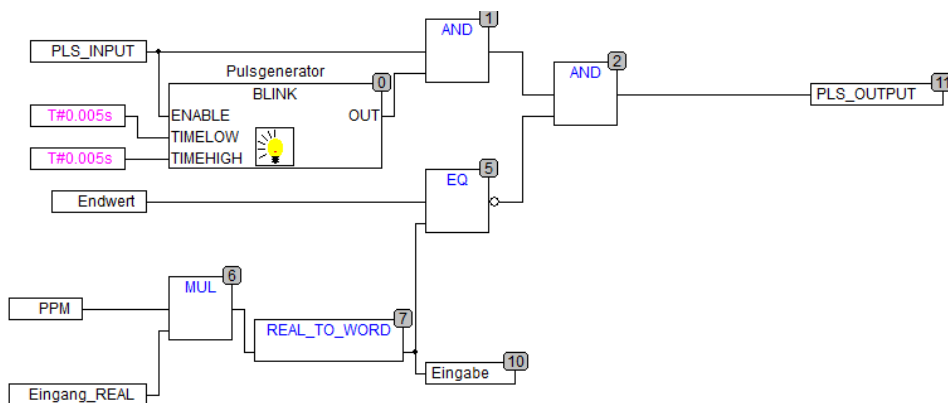


Bild 28: Automatisierung des Schrittmotors - Vergleich zu Bild 25

Wie in Bild 28 graphisch dargestellt, entfällt der „Aufwärtszähler“ sowie die nachfolgenden AND- und OR-Funktionsblöcke. Hinzugekommen ist EQ (5), welcher den eingegeben Wert mit dem Endwert vergleicht.

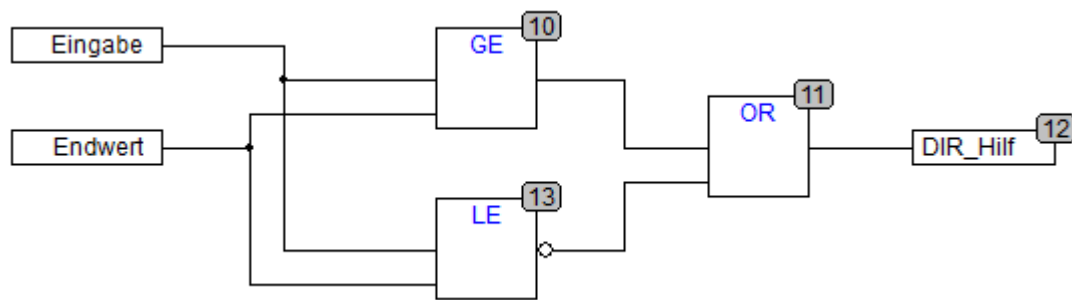


Bild 29: Automatisierung des Schrittmotors Richtungswahl - Vergleich zu Bild 26

Während des Betriebes des Motors wird zudem ersichtlich, dass die Funktionsblöcke „Waage“ und „Waage_2“ nicht mehr benutzt werden müssen, da die Wago nicht, wie in der vorangegangenen Test-Simulation erforderlich, die Flanken am Start des Programmes addiert beziehungsweise subtrahiert. In Bild 29 ist die Richtungswahl ohne diese Funktionsblöcke dargestellt.

2.2.2 Automatisierung des Nadelventils im Sekundärkreis

Das Nadelventil im Sekundärkreis ist für die Ölzufuhr zur Verdampferspirale verantwortlich. Das Volumen des zugeführten Öls wird über die Öffnung bestimmt. Je weiter es sich öffnet, desto mehr Öl kann in die Verdampferspirale und den Brennraum gelangen. In der unten folgenden Bild 30 ist die Automatisierung des Nadelventils abgebildet.

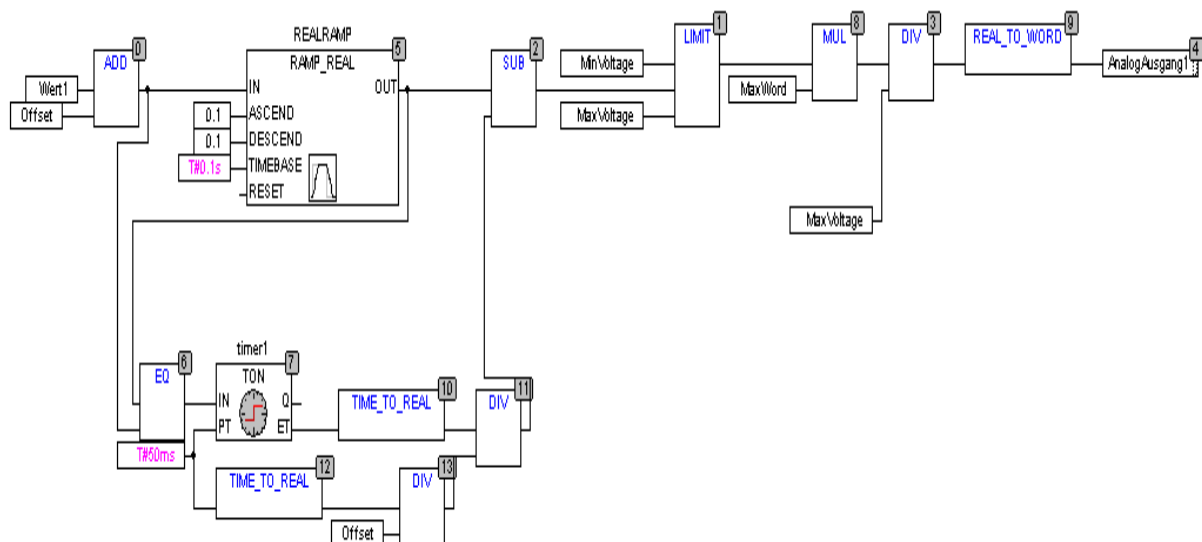


Bild 30: Automatisierung des Nadelventils im Sekundärkreis

Der Wert 1, in welchen man die gewünschte Öffnung des Nadelventils in Volt angibt, kann von 3,8 V (niedrigste Öffnung) bis zu 4,1 V (höchste Öffnung) bestimmt werden. Im weiteren Verlauf der Versuchsdurchführungen versagte die konstant laufende Ölpumpe des Sekundärkreislaufes, diese wurde ersetzt durch eine direkt ansteuerbare Hubkolbenpumpe der Fa. Thomas-Magnete, die üblicherweise in Standheizungen verbaut wird.

Die folgende Abbildung zeigt diese, eingebaut im Versuchstand.

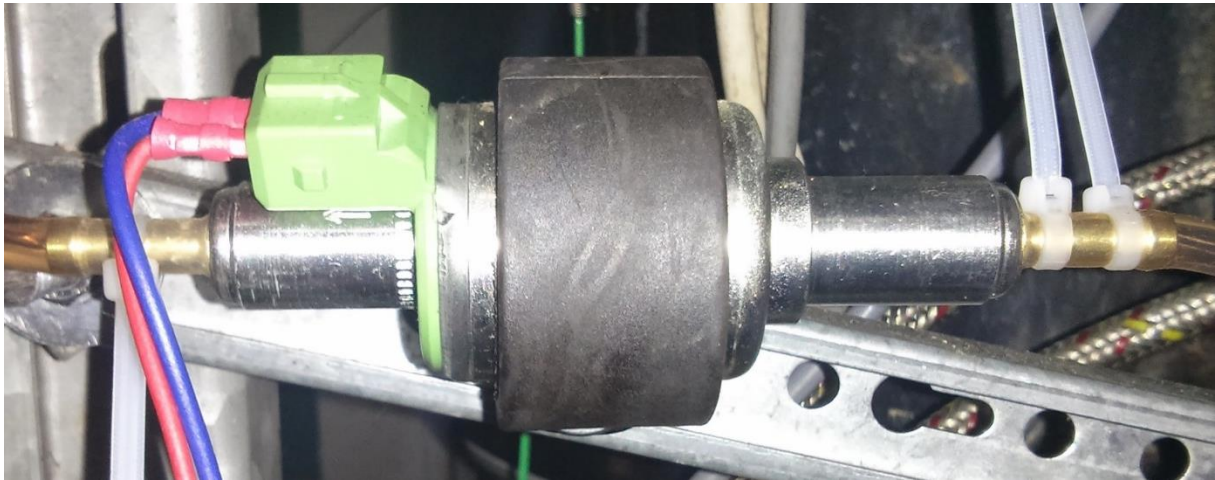


Bild 31: Hubkolbenpumpe des Sekundärkreislaufes

Bild 32 zeigt, dass sich die Kennlinie des geförderten Ölmassenstrom in Abhängigkeit der Hubfrequenz in guter Näherung linear verhält.

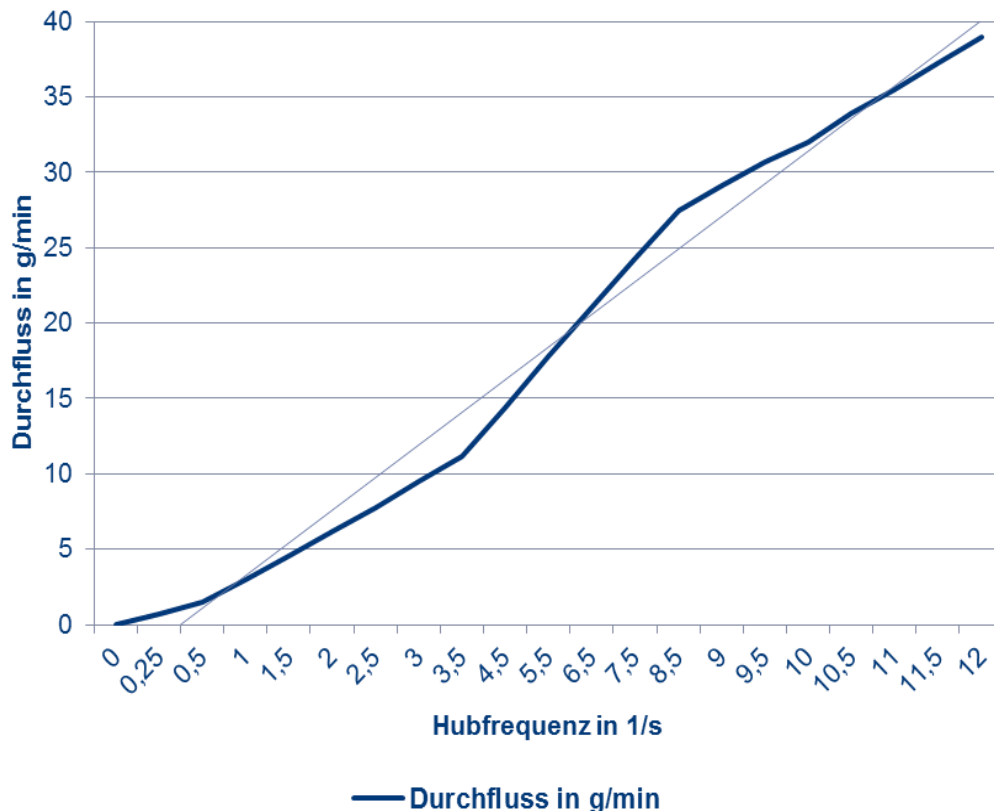


Bild 32: Durchflusskennlinie der eingesetzten Hubkolbenpumpe

Die Fördermengen der eingesetzten Pumpe liegen im Bereich der für den Ölbrenner relevanten Durchflussmengen. Da die Pumpe direkt ansteuerbar ist, sind keine weiteren Regeleinrichtungen für den Ölmassenstrom erforderlich. Der vom Arbeitsprinzip vorliegende pulsierende Betrieb der Pumpe wirkt nur bei kleinen Förderleistungen bis in das Gesamtsystem.

2.2.3 Automatisierung des Gebläses für die Verbrennungsluft

Für die Automatisierung des Gebläses wird mittels der CoDeSys die gewünschte Drehzahl in ein Textfeld eingegeben. Dieser Zahlenwert wird dann von der Wago zum digitalen Feuerungsautomaten des Brenners übertragen. Um die eingestellten Parameter im digitalen Feuerungsautomaten zu verändern, musste ein sogenanntes Sicherheitsdongle (Kopierschutzstecker) bei der Firma Elster Kromschroder beantragt werden. Über ein Kommunikationsinterface (CI) können die Parameter "Vorbelüftungszeit/-drehzahl, Nachbelüftungszeit/-drehzahl, Sicherheitszeit, Stabilisierungszeit/-drehzahl, Lage der Schaltpunkte für das Magnetventil V2, Gebläsedrehzahl in der 1./2. Laststufe sowie die Anzahl der Startversuche bei Flammenabriss (während der Sicherheitszeit sowie im Betrieb)" geändert werden.

Der digitale Feuerungsautomat wird über das Programm CMLab für CM12x der Firma Elster Kromschroder auf die Regelung des Gebläses geschaltet.

Sollen die Parameter für das Gebläse statt über das Textfeld in CMLab für CM 12x in der CoDeSys verarbeitet werden, muss das entsprechende Textfeld in CMLab für CM 12x auf „Steuerung“ gesetzt werden, da andernfalls die Regelung eine Rückkopplung der Ausgangsgröße zum Eingang liefert.

Da die oben genannten Parameter im digitalen Feuerungsautomaten zuvor durch eine Rückkopplung geregelt wurden, sind diese für den Steuerungsfall neu einzustellen. Diese werden bei mehreren Versuchen für die Umstellung von der Stufe 1 auf die Stufe 2 des Brenners empirisch ermittelt, wobei ein möglichst niedriger CO-Wert eingestellt wurde. In Bild 33 sind die eingestellten Sicherheitsparameter dargestellt.

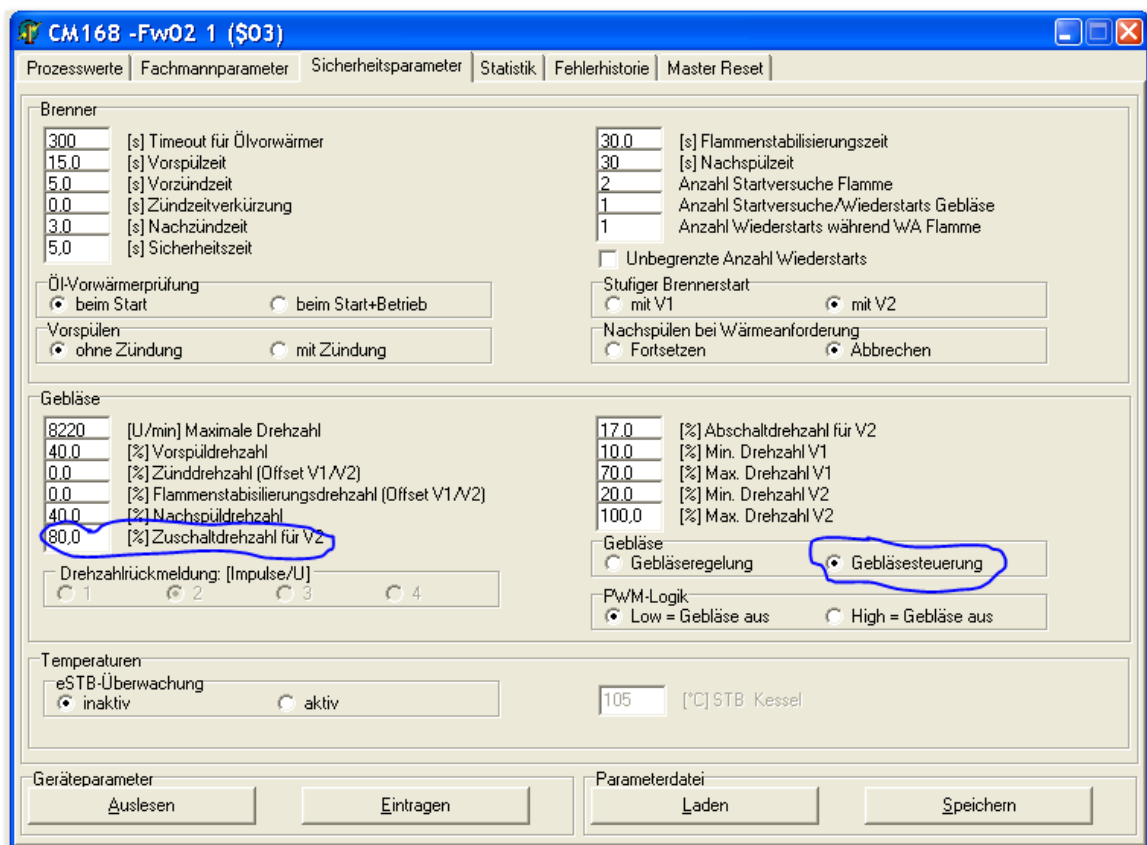


Bild 33: Eingestellt Sicherheitsparameter für den digitalen Feuerungsautomaten im Programm CMLab für CM 12x

2.2.4 Steuerungs- und Regelungskonzept des Gesamtsystems

Das Verfahrensschema für die Brennersteuerung des Versuchsstandes für die ersten Versuchsreihen ist in Bild 34 dargestellt. Startpunkt für die Brennersteuerung ist die Wärmeanforderung aus der Kesselsteuerung.

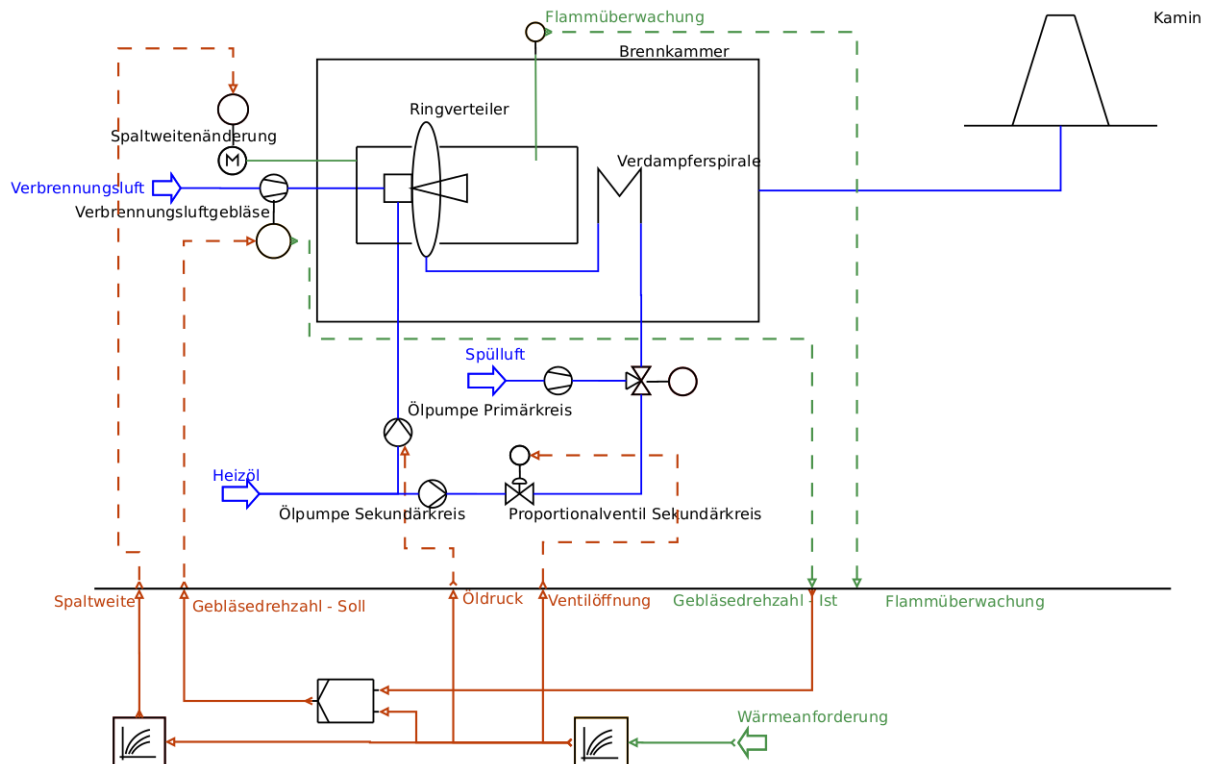
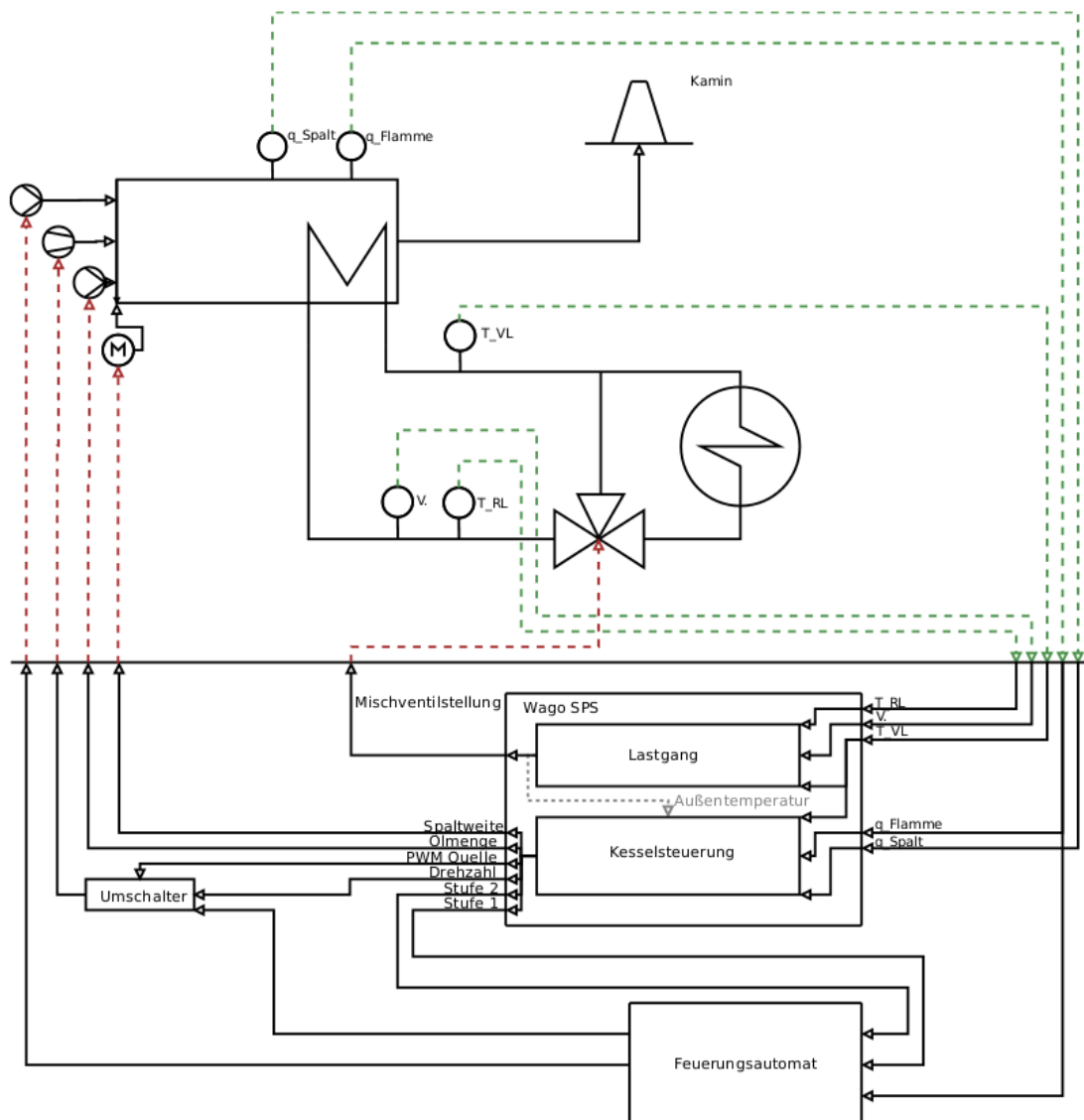


Bild 34: Verfahrensschema der Brennersteuerung

Die Wärmeanforderung wird über ein Kennlinienfeld auf eine benötigte Leistung abgebildet. Anschließend werden für den Primärkreis die Brennerstufe ermittelt und für den Sekundärkreis die Betriebsparameter Ölmassestrom (über die Ventilöffnung bzw. die Hubfrequenz einer Kolbenpumpe), die optimale Spaltweite bzgl. NOx-Emission und Flammstabilität und die Gebläsedrehzahl (Sollwert) vorgegeben. Alle Größen mit Ausnahme der Gebläsedrehzahl sind in diesem Schema lediglich Steuergrößen, es findet also keine Rückkopplung statt. Die Gebläsedrehzahl wird ausgelesen und mit dem Sollwert verglichen, so dass in diesem Punkt eine Regelgröße vorliegt.

Das Ziel, Lastgänge nachzufahren, erfordert eine Erweiterung dieses Verfahrensschemas. Bild 35 zeigt im Kern das aus Bild 34 bekannte Schema, in dem ein Aktor – in diesem Fall eine SPS der Firma Wago – Einfluss auf Brennerstufen, Ölmenge, Spaltweite und Gebläsedrehzahl nimmt.

Eingefügt ist brennerseitig die Umschaltung für die Gebläsedrehzahl sowie die Einbindung des Feuerungsautomaten in das Schema (Ausgänge). Zusätzlich benötigt die Steuerung einen Endlagenschalter für die Spaltöffnung als Eingangssignal sowie das Flammsignal, um bei einem Flammabbruch den Brenner sofort herunterzufahren.



Eingangssignale an der SPS:

- T_{VL} Vorlauftemperatur
- T_{RL} Rücklauftemperatur
- q_{Flamm} Flammensensor
- q_{Spalt} Endlagenschalter
- U_{IDM} Durchflussmesser
- U_{Hall} geplant: Gebläsedrehzahl

Ausgangssignale aus der SPS:

- d_{St1}, d_{St2} Wärmeanforderung Stufe 1 und Stufe 2
- U_{PV} Spannung am Proportionalventil im Sekundärkreis
- d_{PWM} Pulsweitenmodulation für die Gebläsedrehzahl
- d_{DIR}, d_{STEP} Ansteuerung des Schrittmotors
- $U_{Mischer}$ Spannung am Dreiwegemischer
- $d_{Umschalt}$ Umschaltung der Drehzahlquelle (SPS/Feuerungsautomat)

Bild 35: Erweitertes Verfahrensschema für die Aufprägung von Lastprofilen auf das Heizsystem

Eine weitere wichtige Ergänzung an diesem Versuchsstand sind die Messgrößen im Heizkreis bestehend aus Vor- und Rücklauftemperatur sowie dem dazu gehörenden Volumenstrom. Hieraus lässt sich die abgegebene Heizleistung bestimmen.

Der Lastgang ist als Tagesprofil in der SPS als Sollwert für die Leistung hinterlegt und wird über eine interne Zeitsteuerung abgefahren. Die Heizleistung ist dabei als Regelgröße im-

plementiert, d.h. es findet ein Abgleich zwischen Sollwert und Istwert der Leistung statt und das Mischventil im Heizkreis wird entsprechend der Regeldifferenz gefahren.

2.3 Lastganguntersuchungen (Blaubrenner)

2.3.1 Tageslastgänge

Der untersuchte Tageslastgang basiert auf dem „Wärmeatlas Baden-Württemberg“ von Blesl, Kempe, Ohl et al. /F44/ aus dem der typische Lastgang für ein Mehrfamilienhaus entnommen wurde. Dieser Lastgang wurde als Tabelle in der SPS hinterlegt. Um auch ein Warmwasserprofil integrieren zu können, wurde das in der DIN 267 veröffentlichte Zapfprofil ebenso als Tabelle hinterlegt und dem Heizprofil überlagert. Parameter dieses Lastprofils sind die Zapfmenge in l/min und die maximale Wärmeleistung. Der resultierende Verlauf des Lastgangs ist in Bild 36 dargestellt.

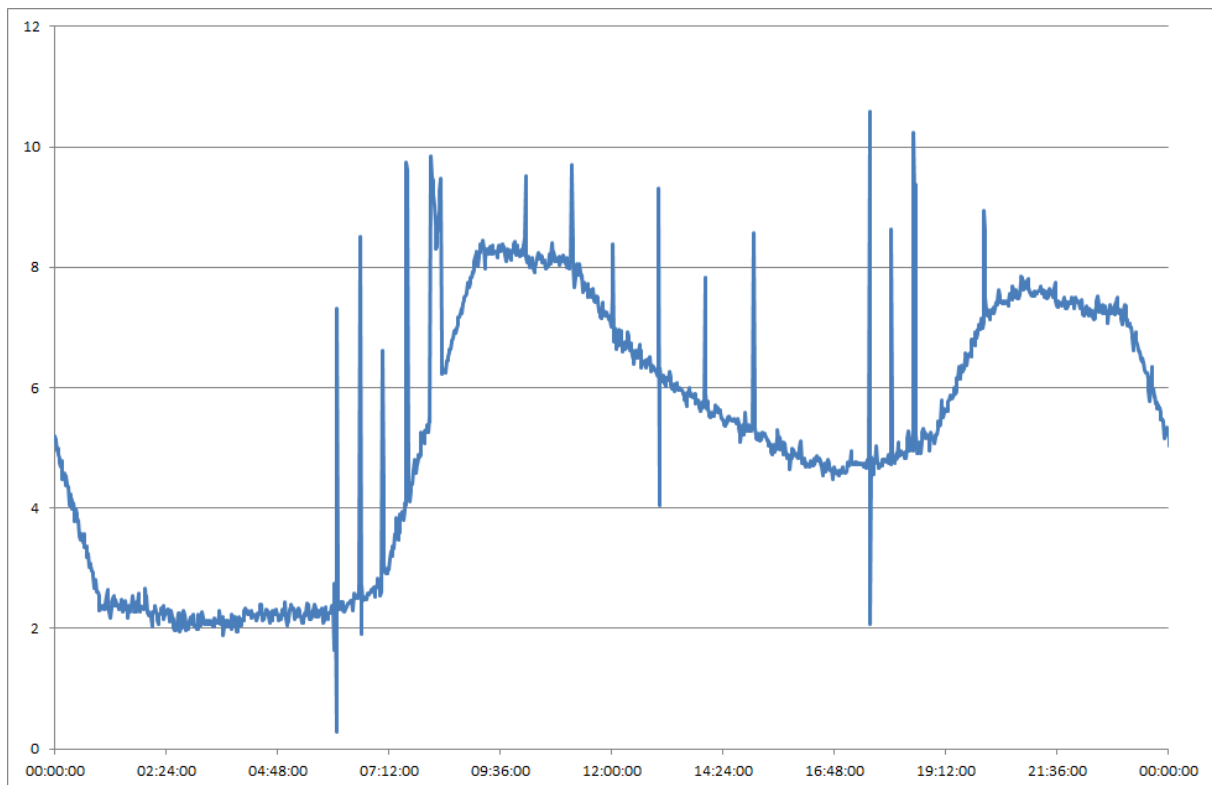


Bild 36: Tageslastgang (Heizung – Mehrfamilienhaus) mit überlagertem Warmwasserprofil

2.3.2 Emissionsverhalten im Lastgangbetrieb

Wird der in Bild 36 dargestellte Tageslastgang dem untersuchten System aus speicherintegriertem Brenner und Warmwasserspeicher aufgeprägt, resultiert die in Bild 37 dargestellte tageszeitabhängige Brennstoffzufuhr. Zu beachten ist hierbei, dass es sich bei dem dargestellten Brennstoffmassenstrom um Viertelstundenwerte handelt, Stillstandszeiten des Brenners sind hierin explizit nicht erkennbar.

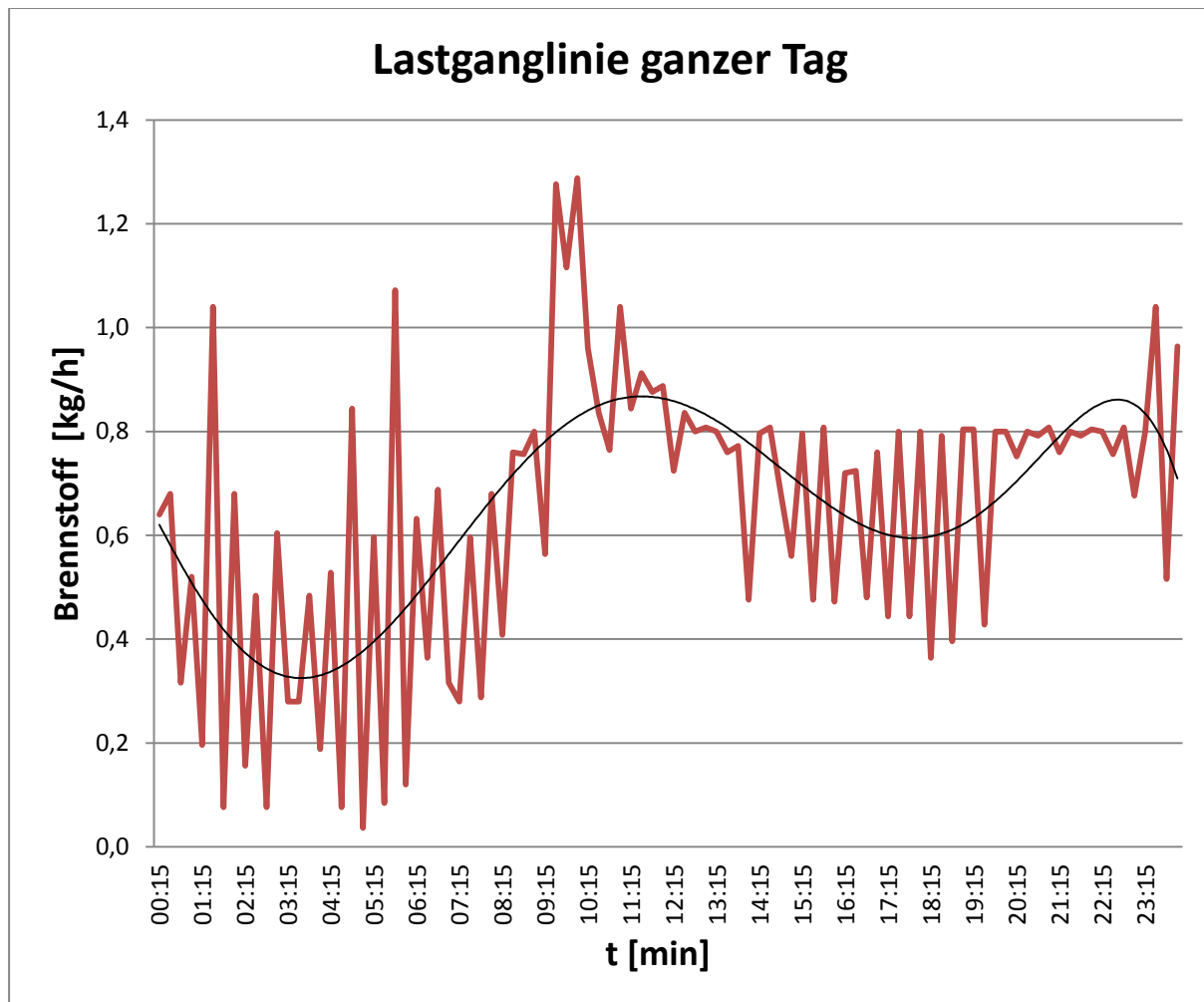


Bild 37: Resultierender Brennstoffmassenstrom aus dem aufgeprägten Tageslastgang mit überlagertem Warmwasserprofil

Diese Stillstandszeiten werden hingegen in den Bildern Bild 38 bis Bild 40 deutlich, die den Tagesverlauf der wesentlichen Abgasparameter (Rest-Sauerstoffgehalt, Stickoxid- sowie Kohlenmonoxid-Emissionen) zeigen. Bei den gemessenen Stickoxid- und Kohlenmonoxid-Emissionen handelt es sich um die gemessenen Rohwerte, auf die noch keine Sauerstoffkorrektur angewendet wurde. Bild 38 zeigt eine Vielzahl von Bereichen, in denen der Restsauerstoffgehalt über 8 Vol.-% liegt. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Brennerstillstandszeiten, das heißt, die in dieser Zeit gemessenen Abgaswerte stammen aus dem in der Brennkammer eingeschlossenen Abgasvolumen, das wegen der Nachbelüftungszeit des Ölbrenners im Wesentlichen aus Luft mit geringen Anteilen von Verbrennungsgasen besteht.

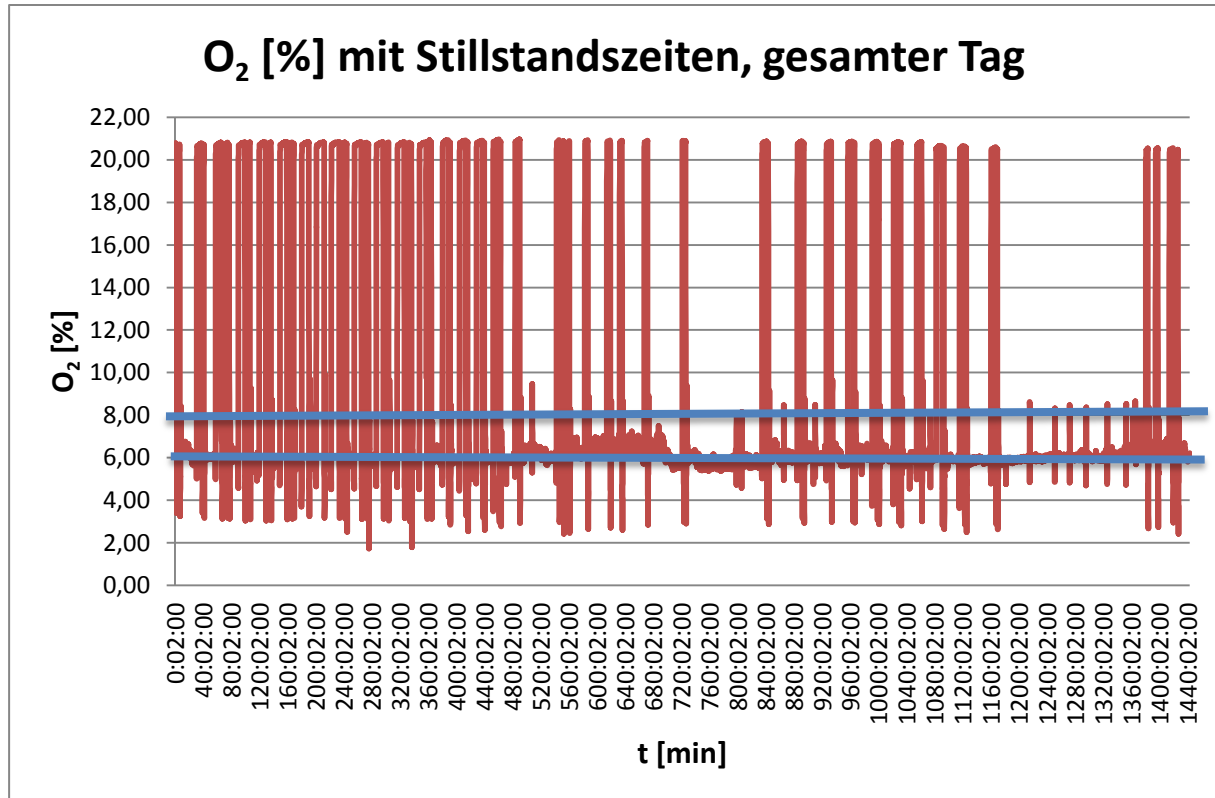


Bild 38: Tagesverlauf der gemessenen Sauerstoffkonzentration im Abgas (mit Stillstandszeiten)

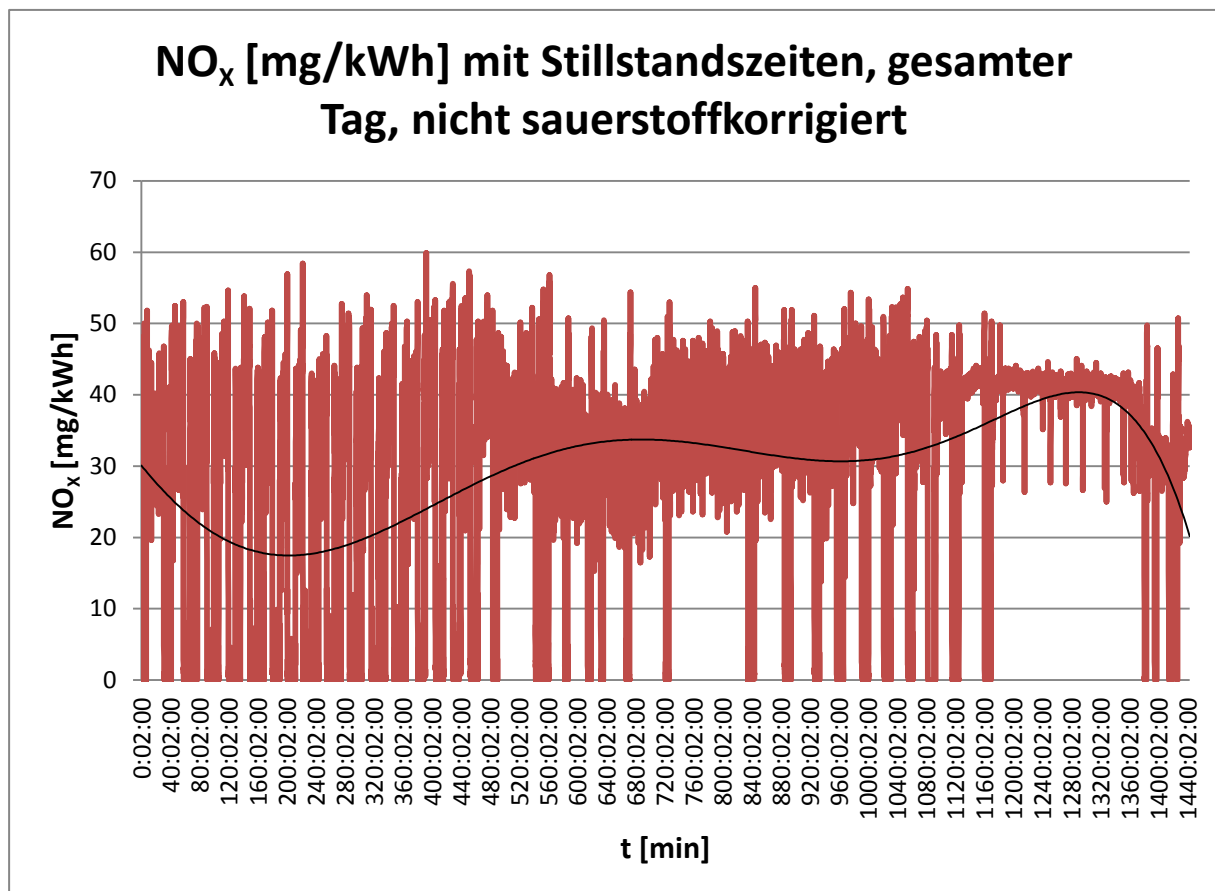


Bild 39: Tagesverlauf der gemessenen Stickoxidemissionen im Abgas (mit Stillstandszeiten, nicht sauerstoffkorrigiert)

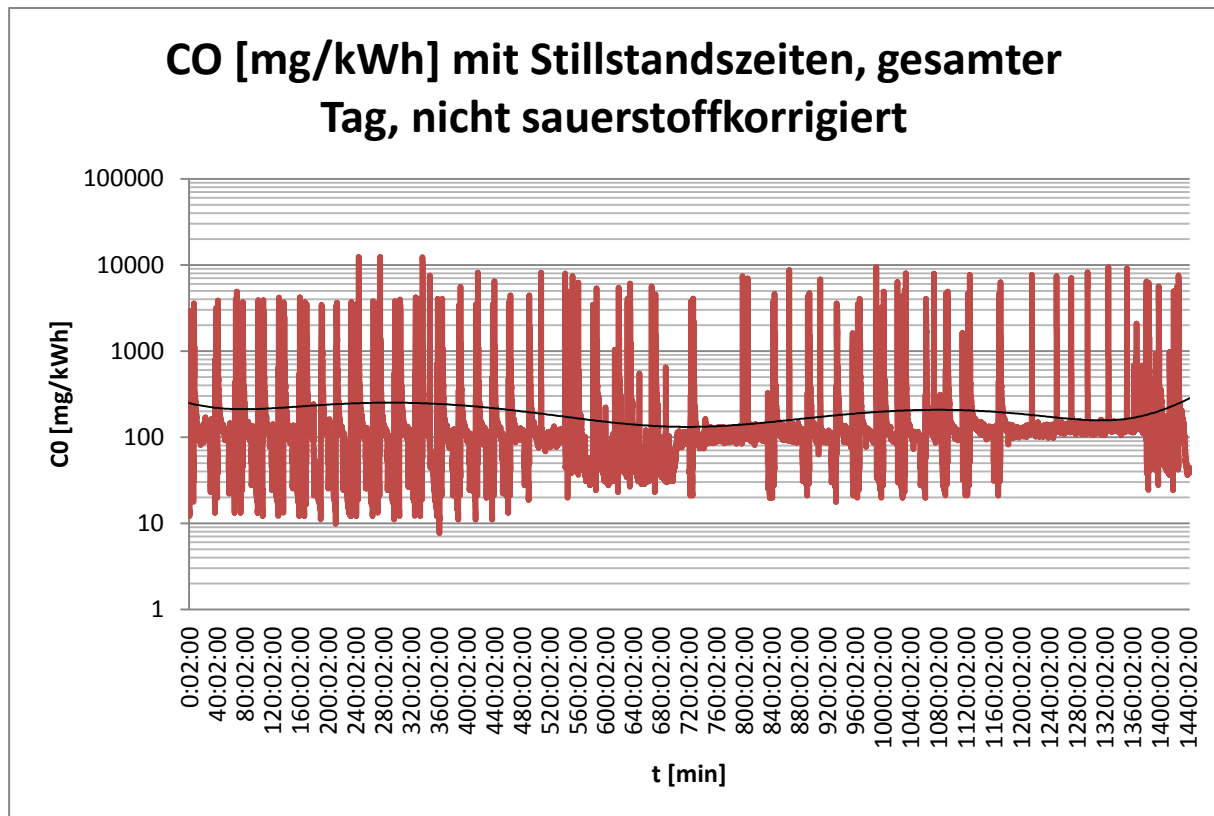


Bild 40: Tagesverlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen im Abgas (mit Stillstandszeiten, nicht sauerstoffkorrigiert)

Die Trendlinie für NO_x zeigt durchgehend Werte unterhalb von 50 mg/kWh, dagegen liegen die Abgaswerte für CO zwischen (100 - 300) mg/kWh. Hierbei ist zu beachten, dass in diesen Werten auch die Emissionen beim Start- und Abfahrbetrieb des Brenners enthalten sind.

Für eine genauere Beurteilung des Emissionsverhaltens werden zunächst die Stillstandszeiten aus den Rohdaten ausgeblendet. Bild 41, das den Rest-Sauerstoffgehalt anzeigt, weist nun einen insgesamt beruhigten Verlauf auf. Auffällig ist das „Untersteuern“ des Ölbrenners, das zu deutlich zu niedrigen Restsauerstoffgehalten (< 4 Vol.-%) im Abgas führt. Entsprechend zeigen die CO-Emissionen (Bild 43) unter diesen Verbrennungsbedingungen ausgeprägte Maxima auf. Der NO_x-Verlauf (Bild 42) zeigt sich diesbezüglich völlig unauffällig (≤ 40 mg/kWh).

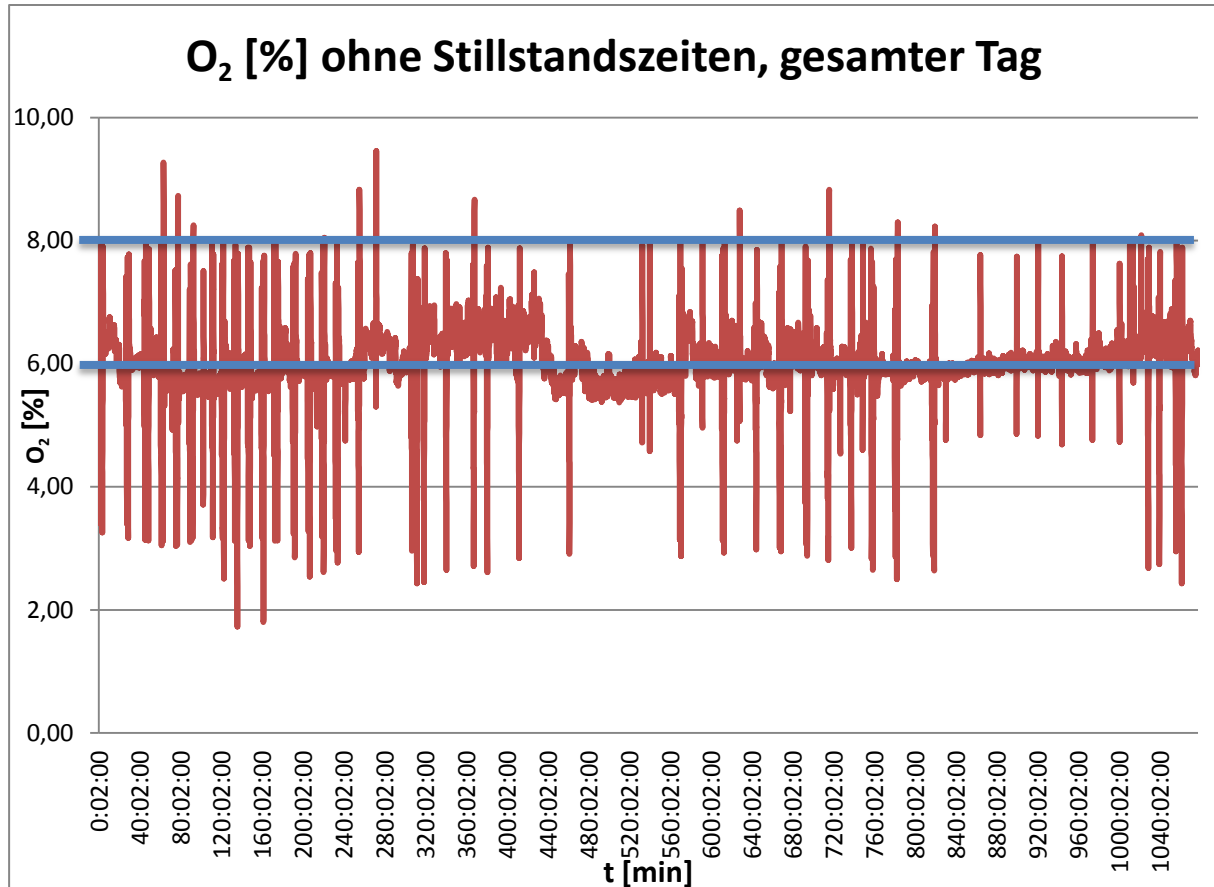


Bild 41: Tagesverlauf der gemessenen Sauerstoffkonzentration im Abgas (ohne Stillstandszeiten)

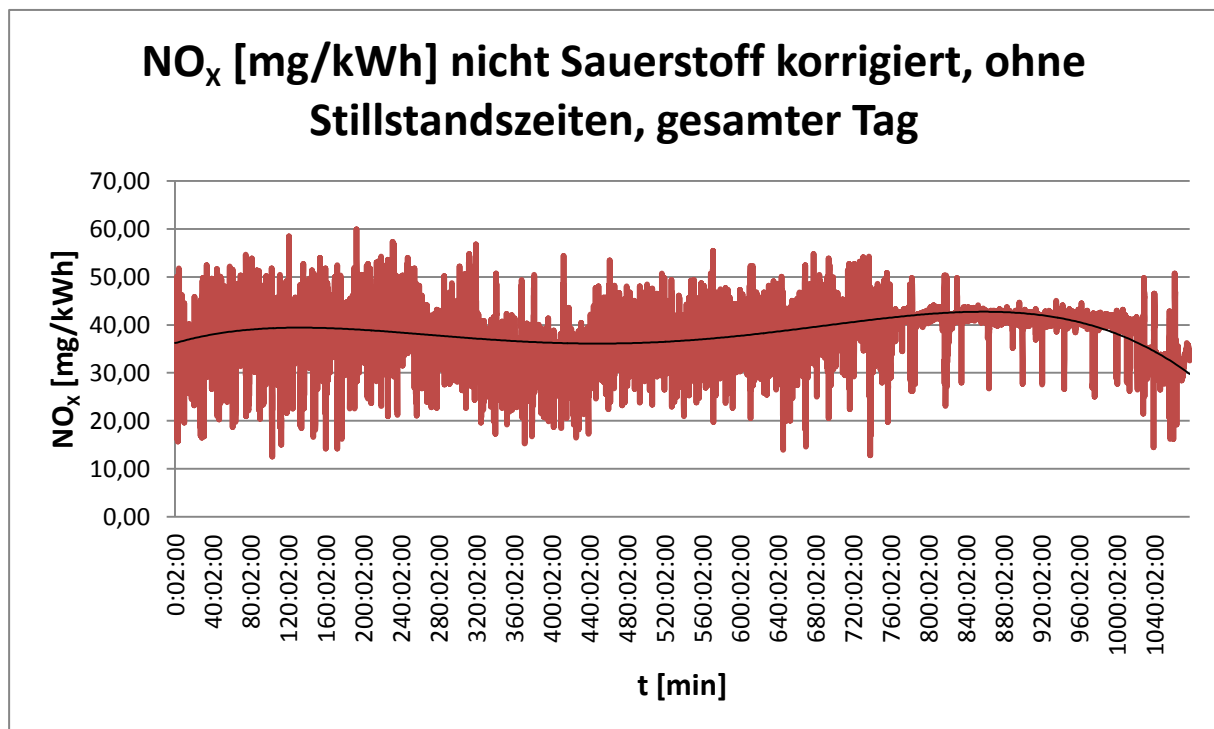


Bild 42: Tagesverlauf der gemessenen Stickoxidemissionen im Abgas (mit Stillstandszeiten, nicht sauerstoffkorrigiert)

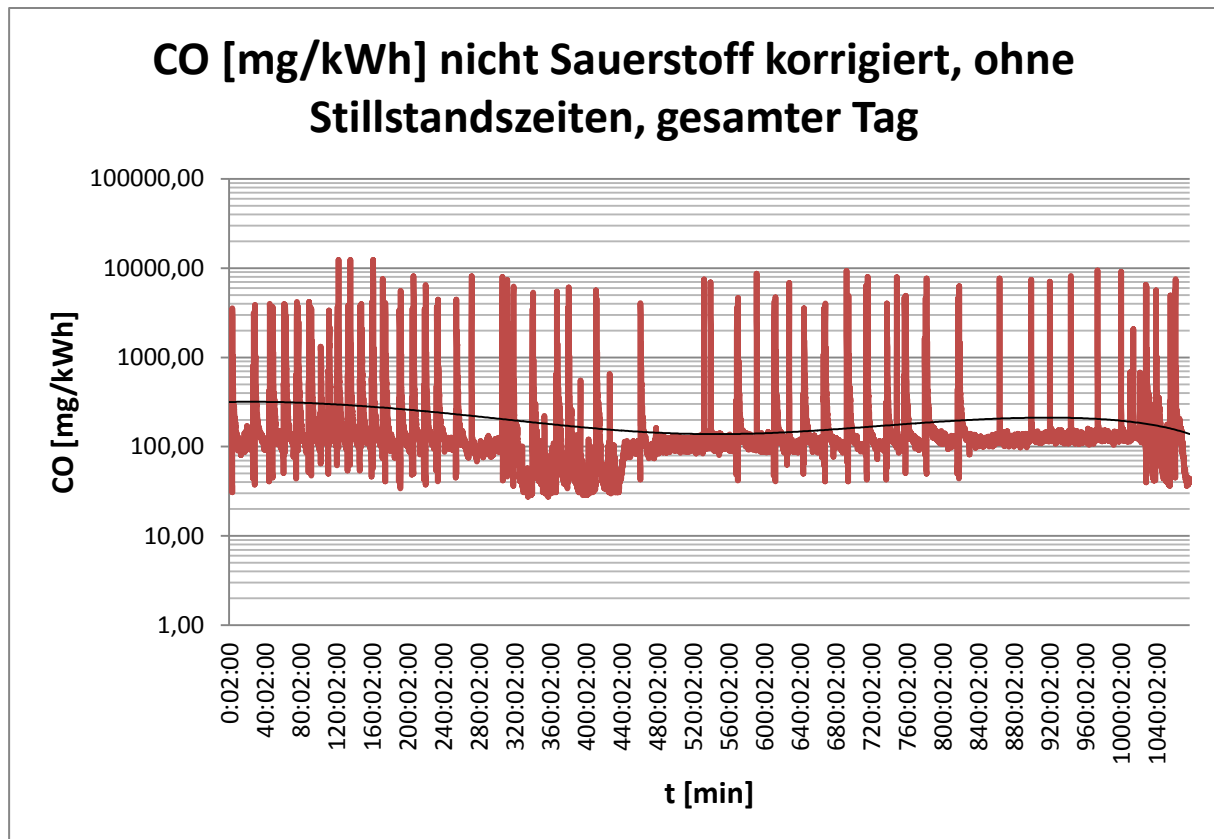


Bild 43: Tagesverlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen im Abgas (ohne Stillstandszeiten, nicht sauerstoffkorrigiert)

Daher werden aus dem Volllastbetrieb drei Perioden ausgewählt, bei denen die Messanforderungen gemäß 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (1. BImSchV) weitestgehend eingehalten sind. Diese Messanforderungen gehen von Messungen im quasi-stationären Betrieb aus, das heißt, An- und Abfahrphasen des Brennerbetriebes sind hier ausdrücklich nicht enthalten.

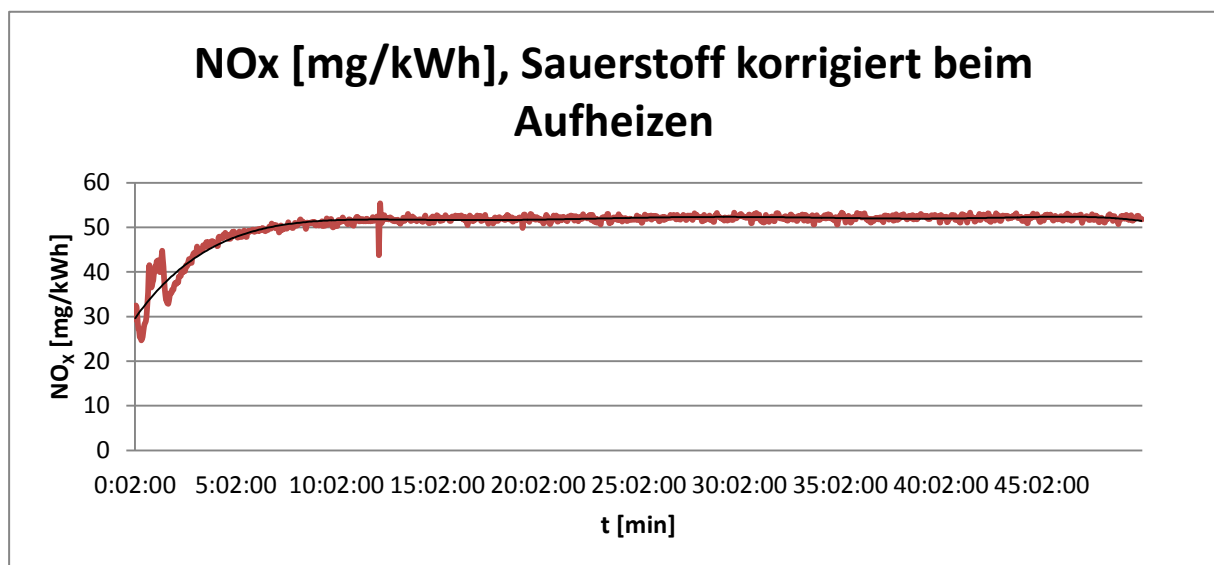


Bild 44: Verlauf der gemessenen Stickoxidemissionen während der Aufheizphase (1. Abschnitt: t = 2 sec bis t = 45 min)

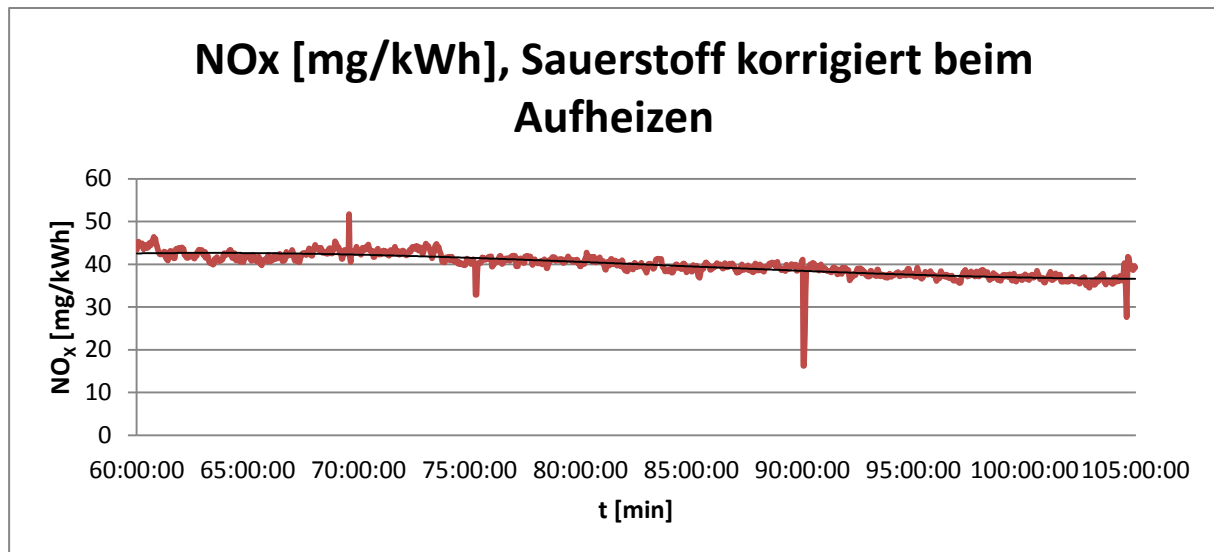


Bild 45: Verlauf der gemessenen Stickoxidemissionen während der Aufheizphase (2. Abschnitt: t = 60 min bis t = 105 min)

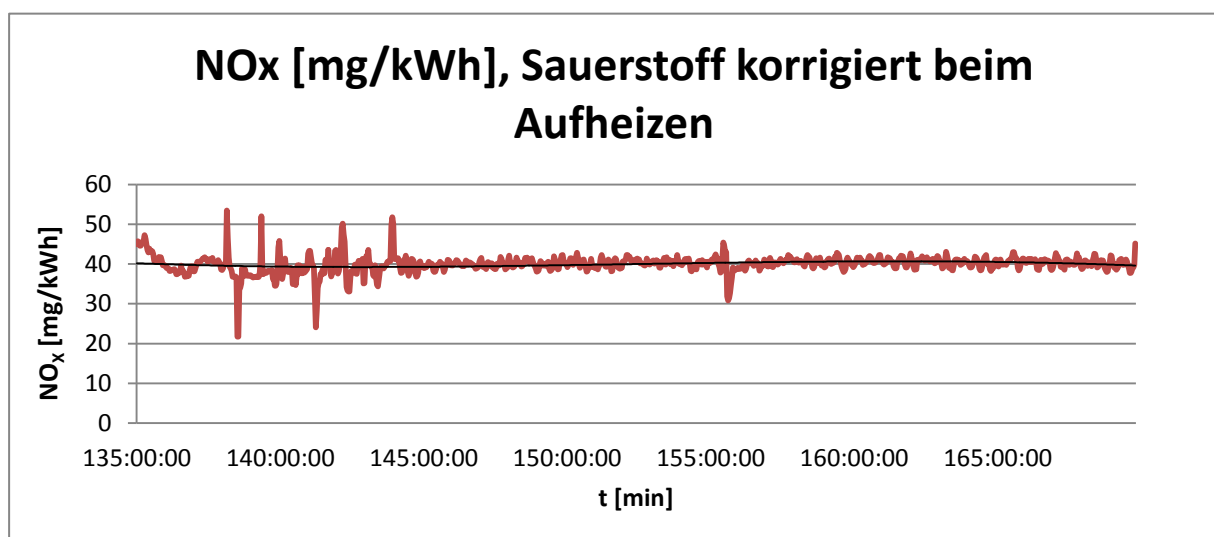


Bild 46: Verlauf der gemessenen Stickoxidemissionen während der Aufheizphase (3. Abschnitt: t = 135 min bis t = 165 min)

Die Trendlinie für NO_x zeigt in Bild 44 durchgehend Werte von ca. 52 mg/kWh, dieser Wert korrespondiert mit Sauerstoffgehalten von ca. 4,5 Vol-%; in den Bildern 45 und 46 liegen diese Stickoxidwerte mit ca. 40 mg/kWh dagegen deutlich unter dem Zielwert von 50 mg/kWh, der Sauerstoffgehalt im Abgas liegt in diesen beiden Abschnitten bei ca. 6,5 Vol-%.

Höhere Werte für den Luftüberschuss bedingen niedrigere Flammentemperaturen und damit niedrigere NO_x-Emissionen. Die Abgaswerte für CO liegen im 1. Abschnitt (Bild 47) nach einer kurzen Anlaufphase bei ca. 25 mg/kWh. In den beiden folgenden Abschnitten (Bild 48 und 49) steigt die CO-Emission auf Werte zwischen (35 - 100) mg/kWh. Die in den Abschnitten 2 und 3 beobachteten höheren CO-Emissionen lassen sich ebenfalls mit dem hier vorliegenden höheren Luftüberschuss und damit niedrigeren Flammentemperaturen erklären.

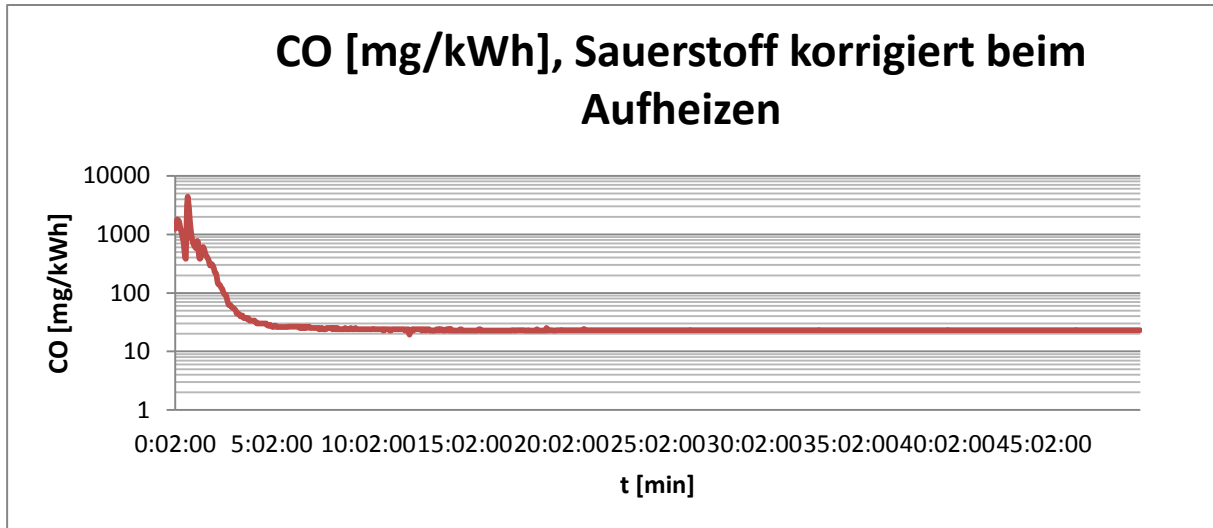


Bild 47: Verlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen während der Aufheizphase (1. Abschnitt: t = 2 sec bis t = 45 min)

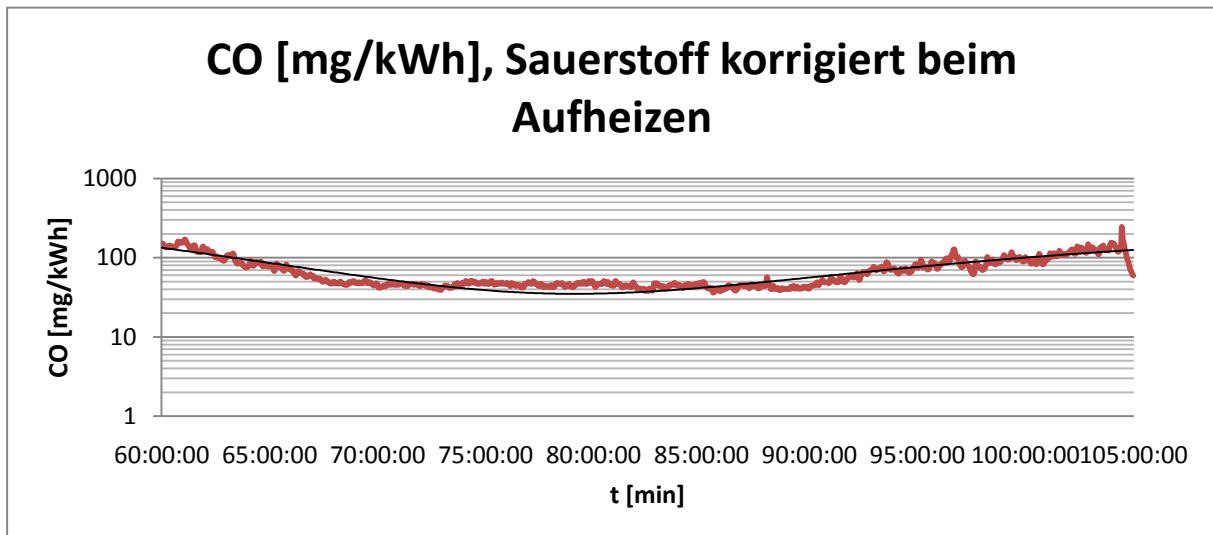


Bild 48: Verlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen während der Aufheizphase (2. Abschnitt: t = 60 min bis t = 105 min)

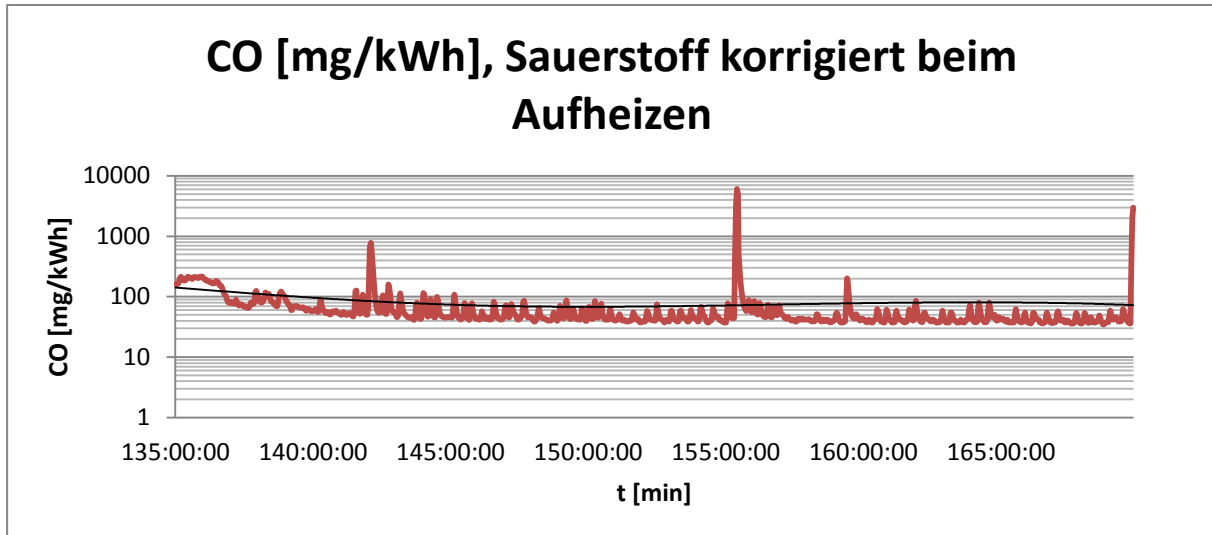


Bild 49: Verlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen während der Aufheizphase (3. Abschnitt: $t = 135$ min bis $t = 165$ min)

2.4 Modifikation eines Oberflächenbrenners

Im zweiten Teil des Projektes erfolgt die Übertragung des Konzeptes der Sekundäröleinspeisung auf eine Feuerung mit einem anderen Primärbrenner. Hierzu stellt Herrmann Brenner GmbH & Co. KG einen vollständig vormischenden Erdgas-Oberflächenbrenner zur Verfügung, der für den Betrieb mit Heizöl modifiziert wird. Bei den Modifikationen handelt es sich um konstruktive Umbaumaßnahmen, die im folgenden Unterkapitel beschrieben werden und daran anschließend hinsichtlich der Zielerreichung beurteilt werden.

Beim Flächenbrenner handelt es sich um einen Vormischbrenner, bei dem ein durchlässiger Reaktionskörper (siehe Bild 50) verbaut wird.



Bild 50: Darstellung von Reaktionskörpern /F52/

Da sich der Reaktionskörper bei Kontakt mit den nahe angrenzenden Flammen und der heißen Verbrennungsgase erhitzt, besteht dieser aus einem temperaturbeständigen Material wie z.B. Keramik oder Metall. Um ein gleichbleibendes Flammenbild zu erhalten, ist ein homogenes Brennstoff-Luftgemisch notwendig, welches durch eine Luftzahl von $\lambda=(1,1\dots1,4)$ gewährleistet wird.

Eine weitere Bedingung ist die homogene Gemischverteilung am Reaktionskörper, d.h. dass an allen Stellen der Brenneroberfläche eine gleichmäßige spezifische Oberflächenbelastung auftreten muss. Die homogene Gemischverteilung wird normalerweise durch entsprechende Verteileinbauten, wie z.B. Lochblechverteiler oder Ringverteiler, realisiert. Diese Einbauten erzeugen allerdings einen Druckverlust, welcher zu Mehraufwand für das Gebläse führt.

Zudem muss der Reaktionskörper möglichst gleichmäßig perforiert sein, um ein gleichbleibendes Flammenbild zu gewährleisten. Die feine Perforation verhindert zusätzlich ein Rückschlagen der Flammen /F53/, /F54/.

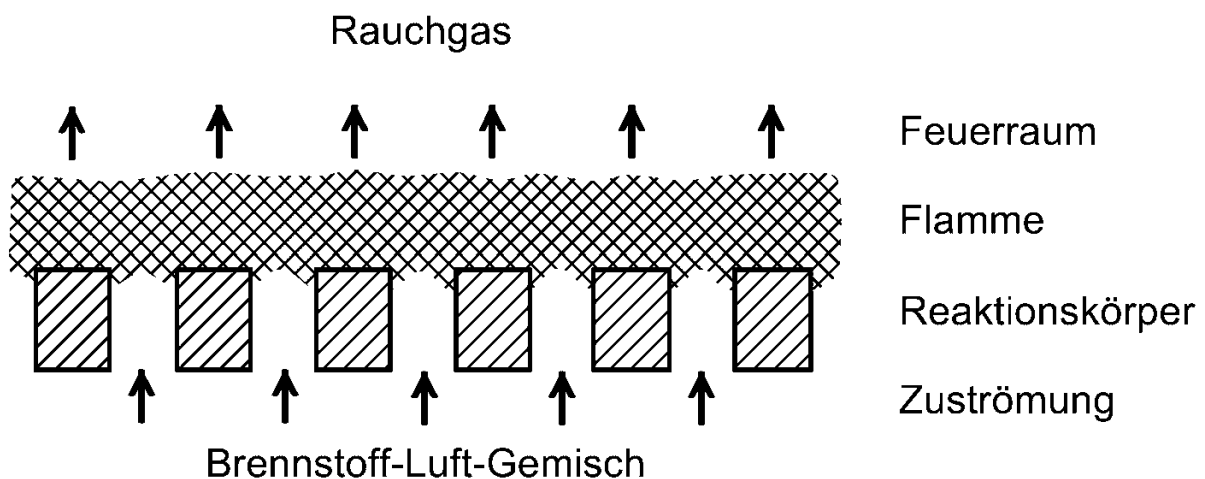


Bild 51: Abbrand am Reaktionskörper (Teilausschnitt) /5/

Gelochte oder geschlitzte Keramik- und Edelstahlkörper sowie Drahtgewebe aus Metall und aus Keramikfaser hergestellte poröse Körper dienen als Reaktionskörper. Diese werden durch die heißen Brenngase und die nahen Flammen erwärmt und geben ihre Wärmeenergie in Form von Strahlung an die umgebenden Feuerraumwände ab (siehe Bild 51). Durch diesen Prozess erniedrigt sich die Flammentemperatur und es entsteht eine gleichmäßige Wärmeverteilung über den Reaktionskörper. Beide Vorgänge begünstigen den Rückgang von thermischen Stickoxiden /F54/.

2.4.1 Bauliche Maßnahmen

Der oben genannte Oberflächenbrenner wird zusammen mit einer Verdampferspirale, einer Ölpumpe und einem Ölfilter auf einer Stahlplatte montiert, um die Verdampfung des Heizöls zu realisieren. Über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) wird der Massenstrom des Öls vorgegeben, der mittels Kolbenpumpe in die Verdampferspirale gefördert wird. Aus Gründen der besseren Beobachtbarkeit des Flammenbildes sowie aus Gründen der Sicherheit wurde der Versuchsstand mobil und als Freiluftanlage ausgeführt (Bild 52).

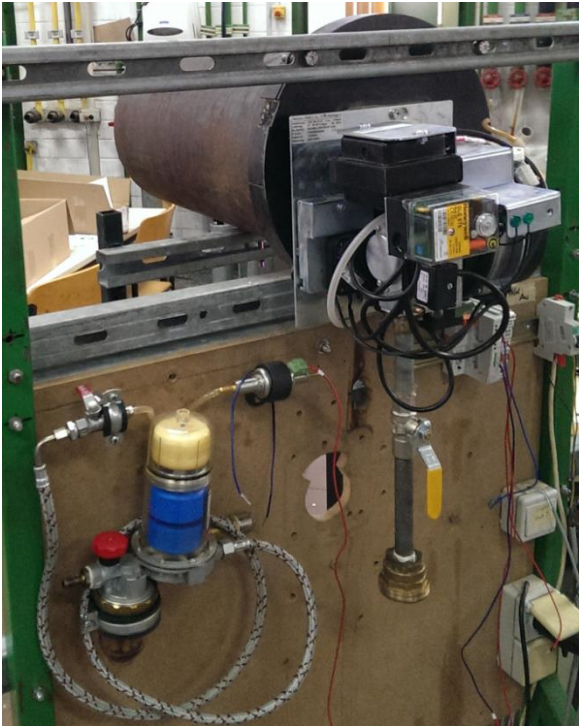


Bild 52: Versuchsaufbau des Oberflächenbrenners als mobile Freiluftanlage

Durch die zugeführte Wärme des Oberflächenbrenners verdampft das Öl in der in Bild 53 dargestellten Spirale; dieses wird anschließend in die Mischkammer des Oberflächenbrenners hineingeführt und dem Gas-Luft-Gemisch beigemischt. Um die Leistung des Brenners ermitteln und regulieren zu können, ist ein Balgengaszähler mit entsprechender Sicherheitsausrüstung und variablem Anschluss zwischen dem Gasleitungsanschluss und dem Versuchsstand montiert.



Bild 53: Ansicht der integrierten Verdampferspirale mit Oberflächenbrenner

2.4.2 Optimierung der Mischung im Brennerrohr des Oberflächenbrenners

Durch Simulationsrechnung soll die Eindüsung und Vermischung des Brennstoffes im Brennerrohr des Oberflächenbrenners optimiert werden. Das Brennerrohr in der vorliegenden Ausführung ist frei von Einbauten. Erste Simulationsergebnisse sowie auch die ersten Vorversuche zeigen, dass ein einfaches Einleiten des verdampften Öls in den Luftstrom keine ausreichende Vermischung gewährleistet.

Es werden zunächst verschiedene Einbaukonzepte wie zum Beispiel der Einbau einer Blende mit Lochkreis und andere statische Mischeinrichtungen betrachtet. Viele dieser Optionen werden jedoch verworfen, da z.B. der erwartete Druckverlust durch die Einbauten sehr hoch wird.

Ein Konzept, das eingehender betrachtet wird, besteht aus einer Prallscheibe und einer Lochblende, welche axial in den Luft- und Öldampfstrom eingebracht werden (Bild 54).

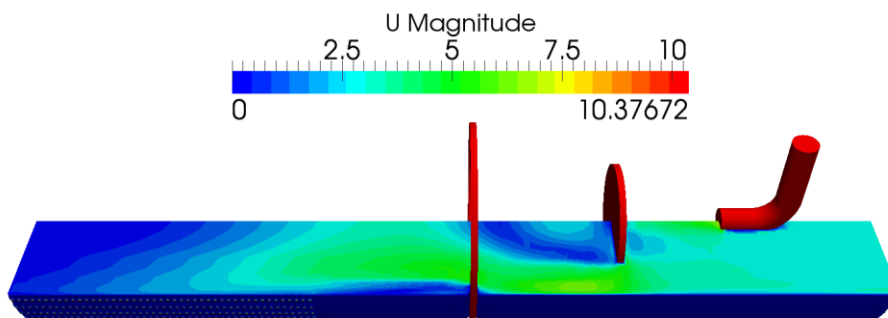


Bild 54: Darstellung des Geschwindigkeitsfeldes in einem Viertel der Fluiddomäne. Die roten Bauteile sind Lochblende, Prallscheibe, Öllanze mit Einströmungsöffnung in das Brennerrohr (von links nach rechts)

Als Zielfunktionen der Optimierung werden die in einem Zielkonflikt stehenden Größen „Druckverlust“ und „erreichte Durchmischung“ betrachtet. Für die Lösung derartiger Probleme sind Verfahren der Mehrzieloptimierung besonders geeignet. Entwurfsvariablen sind die axiale Position der drei beschriebenen Einbauteile sowie die Durchmesser der Prallscheibe und der Lochblende.

Zielfunktionen sind der mittlere Druckverlust zwischen Einlass und Auslass sowie die Standardabweichung des Ölmassenstroms auf dem Auslasspatch. Es liegen zwei Minimierungsprobleme vor.

Zur Lösung wird ein sogenannter Pareto-Optimierer eingesetzt. Das Ergebnis der Mehrzieloptimierung ist eine zweidimensionale Lösungswolke, welche zu einer Pareto-Front hin konvergiert wie in Bild 55 dargestellt. Bezüglich der Mehrzieloptimierung sind alle Entwürfe, die auf der Pareto-Front liegen, optimal. Es ist die Aufgabe des Ingenieurs, z.B. durch die Eingrenzung eines Parameters, eine in Bezug auf das Problem optimale Lösung auszuwählen.

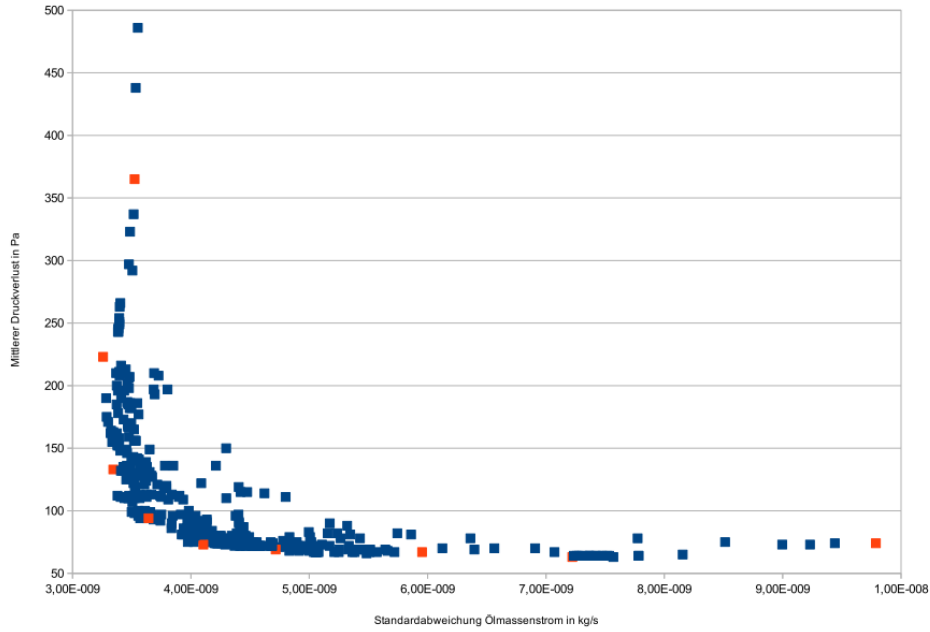


Bild 55: Ergebnis der Mehrzieloptimierung, alle simulierten Entwürfe und Ausbildung der Paretofront

Zur oberen und rechten Grenze der Darstellung hin erkennt man, dass die Front noch nicht voll auskonvergiert ist, interessant für die weitere Betrachtung ist vor allem der linke untere Bereich der Darstellung.

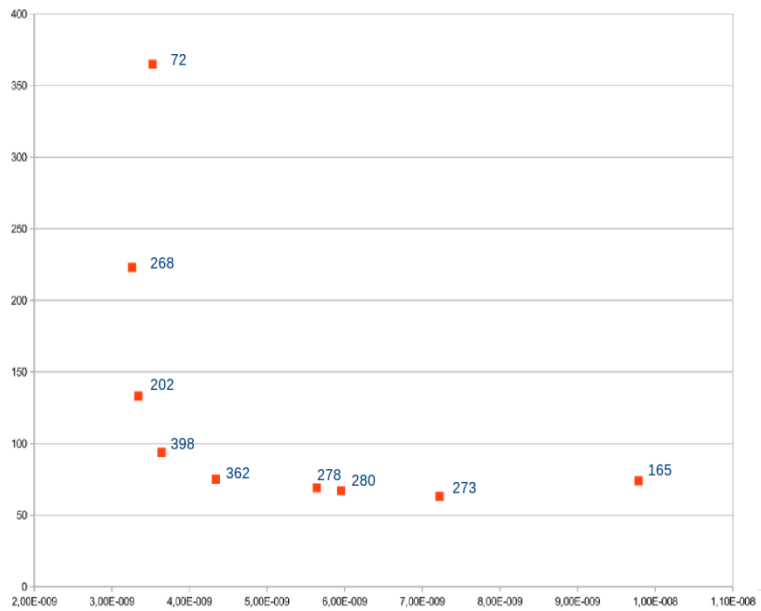


Bild 56: Markierte Entwurfspunkte auf der Paretofront mit Entwurfsnummern

Auf der Paretofront wurden einige Entwürfe markiert und mit den zugehörigen Entwurfsnummern versehen und ausgewertet (Bild 56). Die Eckpunkte (72, 165 und 398) werden im Folgenden dargestellt (Bild 57 bis Bild 59).

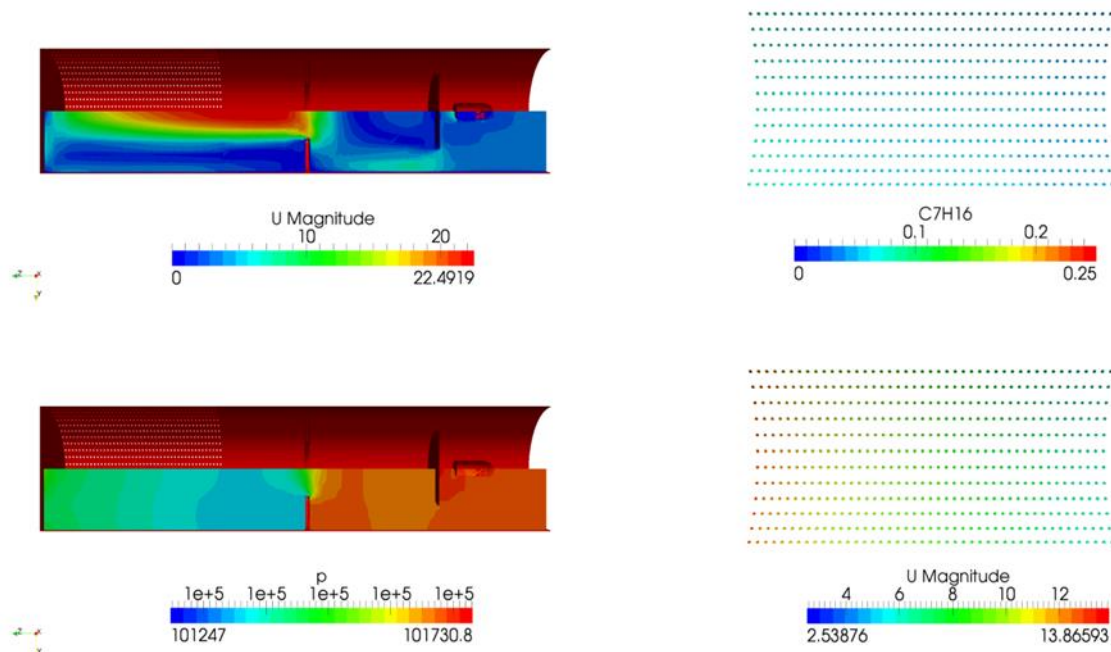


Bild 57: Lauf 72 – (links) Geschwindigkeitsfeld und Druckverteilung in der Fluidomäne, (rechts) Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilung auf dem Auslass

Bild 57 zeigt die Simulationsergebnisse für den Entwurf mit der Nummer 72. Der Druckverlust ist mit ca. 370 Pa zwischen Ein- und Auslass relativ hoch. Dieses liegt vor allem am geringen Durchmesser der Lochblende, allerdings wird eine gute Durchmischung auf dem Auslass erzielt, jedoch ist das Geschwindigkeitsprofil auf dem Auslass nicht ganz gleichmäßig.

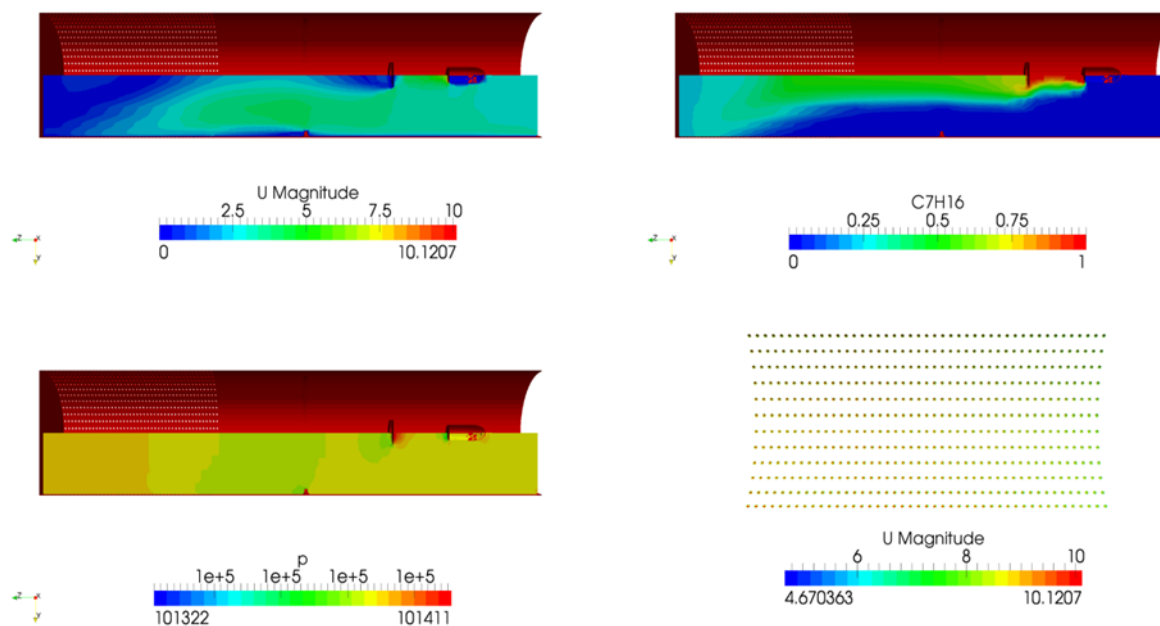


Bild 58: Lauf 165 – (links) Geschwindigkeitsfeld und Druckverteilung in der Fluidomäne, (rechts) Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilung auf dem Auslass

Bild 58 zeigt die Simulationsergebnisse für den Entwurf mit der Nummer 165. Der Druckverlust ist mit ca. 70 Pa zwischen Ein- und Auslass relativ niedrig, dafür zeigt die Konzentrationsverteilung eine sehr ungleichmäßige Durchmischung. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Einbauten insgesamt sehr klein ausfallen und kaum Wirkung entfalten können.

Der nach Bild 55 und Bild 56 vielversprechendste Punkt ist der Entwurf mit der Nummer 398. Wie man in Bild 59 erkennt, ist die Prallscheibe sehr groß, während die Lochblende nur minimal ausgebildet ist.

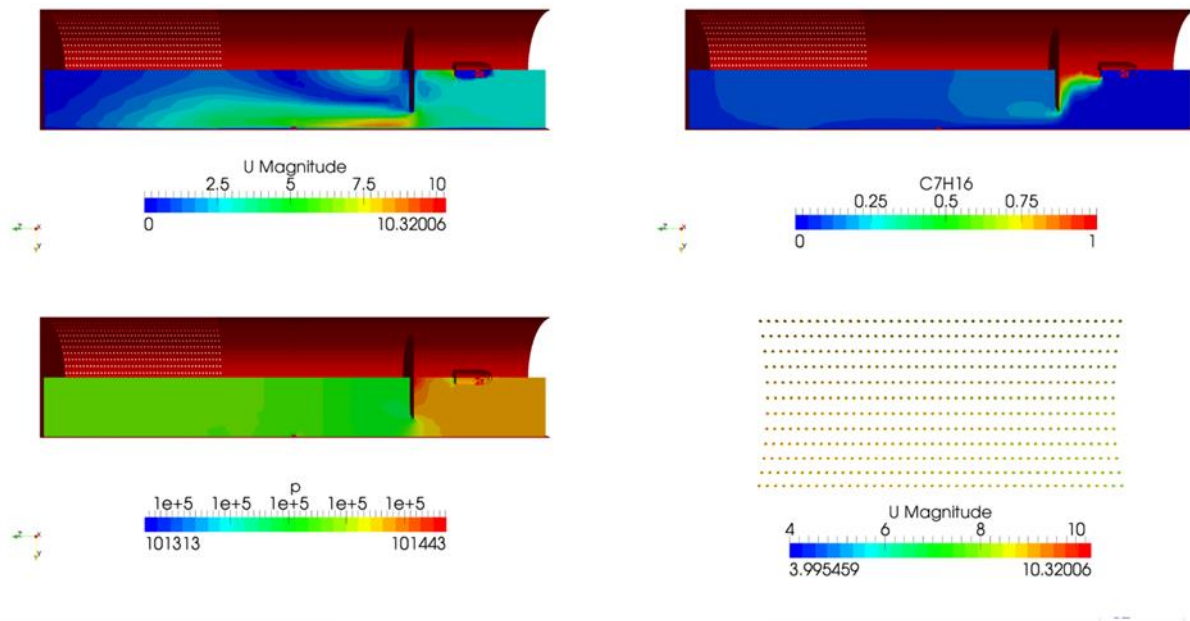


Bild 59: Lauf 398 – (links) Geschwindigkeitsfeld und Druckverteilung in der Fluiddomäne, (rechts) Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilung auf dem Auslass

Der Druckverlust in diesem Entwurf liegt bei knapp 100 Pa, die Durchmischung ist gut, wie auch im Konzentrationsfeld zu erkennen, ist auch die Geschwindigkeitsverteilung auf dem Auslass ziemlich gleichmäßig. Die Eckdaten dieses Entwurfs werden als Grundlage für den Umbau des Versuchsstandes verwendet.

2.4.3 Verbrennungsversuche am offenen Teststand

Voraussetzung für die Verbrennung von Heizöl in einem Oberflächenbrenner ist, dass es als homogene Gasphase vorliegt. Dieses ist zu Beginn des Brennerbetriebes, also in der Startphase, noch nicht gegeben, da das Heizöl zu diesem Zeitpunkt ausschließlich in flüssiger Form vorliegt. In der Startphase wird daher der Oberflächenbrenner zunächst mit Erdgas befeuert, um die erforderliche Wärme für die Verdampfung des Heizöls zu liefern. Nachdem das Heizöl innerhalb der Verdampferspirale vollständig verdampft ist, wird es in das Flammrohr eingeleitet. Nach Stabilisierung des Verdampfungsprozesses wird über eine Absperrarmatur in der Gaszuleitung der Gasvolumenstrom stufenweise gedrosselt, der Brenner schließlich einen autonomen Betrieb ausschließlich mit Heizöl erreicht.

2.4.3.1 Positionsermittlung & Spiralenabstand

Um ein Ausglühen der Verdampferspirale zu verhindern, wird zunächst die günstigste Entfernung der Verdampferspirale zum Brenner ermittelt. Dazu wird die Aufhängung der Spirale möglichst variabel gestaltet. Die Höhe wird dabei so ausgerichtet, dass sie während des Versuches gleich bleibt und nur der Abstand zwischen Brenner und Spirale variiert wird. Dazu werden ein Laborstativ und mehrere Laborklemmen benutzt (siehe Bild 60).

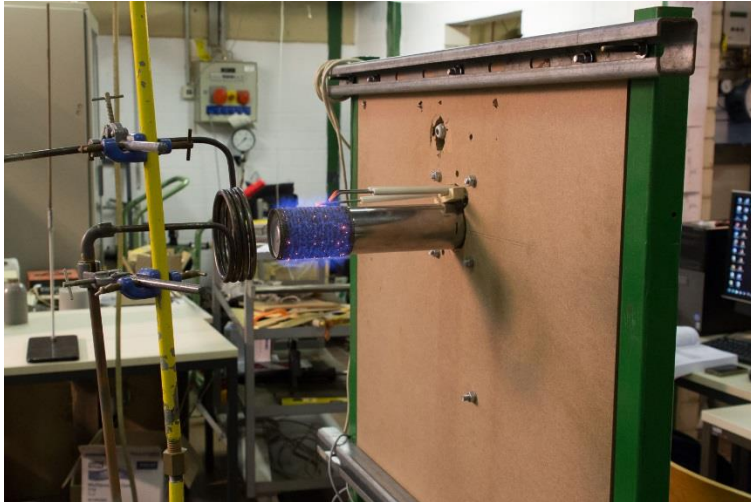


Bild 60: Versuchsaufbau zur Ermittlung des optimalen Spiralenabstandes

Die ersten Positionierungsversuche werden mit dem Versuchsmedium Wasser durchgeführt und beginnen mit einem Abstand von 3 cm zwischen Brenner und Spirale. Der Abstand wird dabei in 0,5 cm Schritten immer weiter verkürzt, bis ein Glühen der Spirale beobachtet werden konnte. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 und Bild 61 dargestellt.

Aus Tabelle 5 und Bild 61 kann abgeleitet werden, dass das Glühen der Spirale zwischen den Abständen von 0 cm und 0,5 cm einsetzt. In diesem Bereich ist das Versuchsmedium Wasser bereits vollständig verdampft. Die Position sollte unter dem Gesichtspunkt festgelegt werden, dass ein Glühen der Spirale aus Gründen der Materialschonung aber auch im Hinblick auf eine schonende Verdampfung des Mediums Heizöl gerade noch vermieden wird. Nach diesen Versuchen wird ein Abstand von 0,5 cm festgelegt.

Massenstrom	Abstand in cm	t ein in °C	t aus in °C	Δt in K	Glühen der Spirale
g/min	3	17,6	55	37,4	nein
11,81	2	17,6	62,9	45,3	nein
	1,50	17,6	66,5	48,9	nein
	1	17,6	83	65,4	nein
	0,5	17,6	99	81,4	nein
	0	17,6	101	83,4	ja
	-0,5	17,6	99	81,4	ja

Tabelle 5: Messwerte des Spiralenabstandes

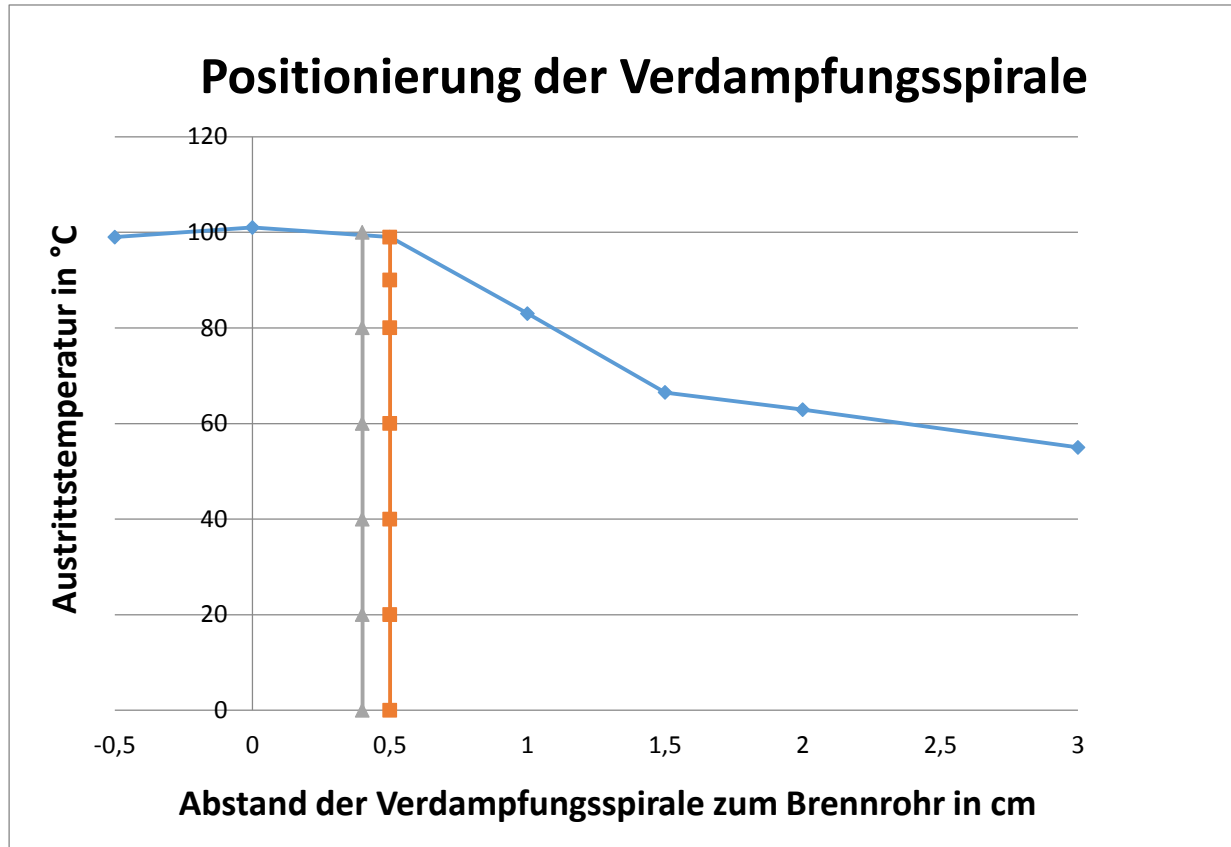


Bild 61: Positionierung der Verdampferspirale

2.4.3.2 Kolbenpumpe

Für die Förderung des Heizöls zur Verdampferspirale wird eine Hubkolbenpumpe (Bild 63) eingesetzt. Diese zeichnet sich durch einen weitestgehend linearen Betrieb aus, wie in Bild 62 gut zu erkennen ist.

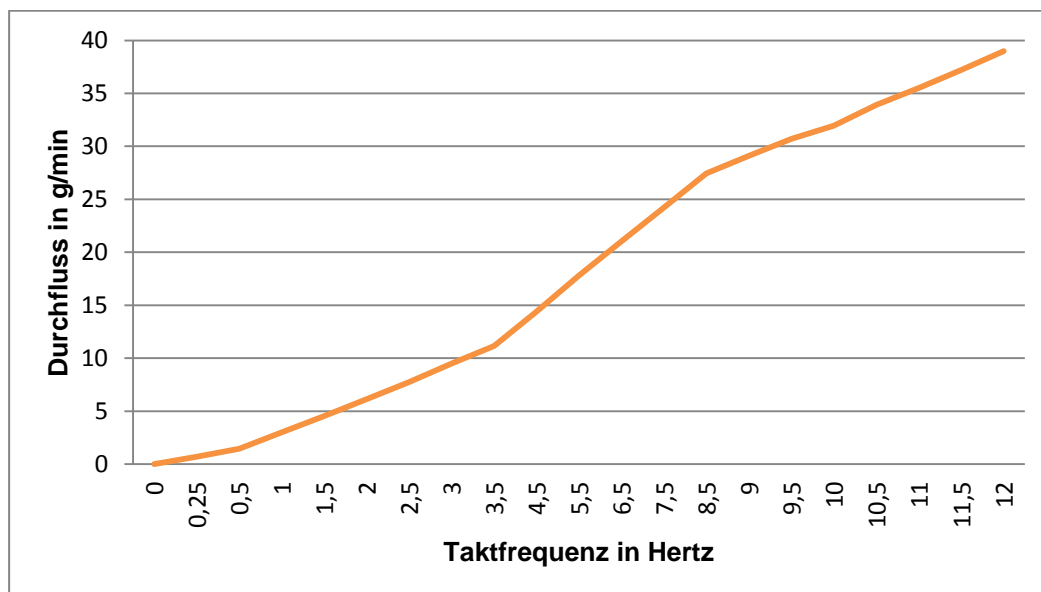


Bild 62: Durchflusskennlinie der Kolbenpumpe in Abhängigkeit von der Hubfrequenz

Aufgrund der Linearität der Kolbenpumpe kann zu einem späteren Zeitpunkt die zugeführte Öl-Leistung genau bestimmt und geregelt werden. Um die Pumpe anzusteuern, wird eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Firma WAGO benutzt.

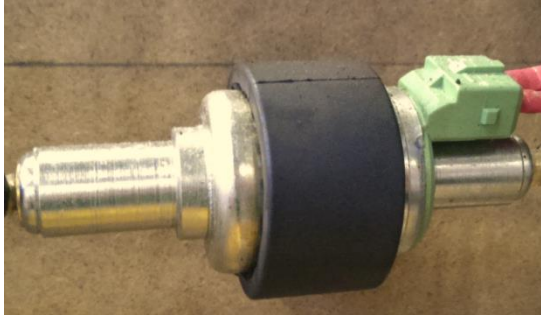


Bild 63: Kolbenpumpe

2.4.3.3 Speicherprogrammierbare Steuerung

Die SPS der Firma WAGO wird benötigt, um die bereits erwähnte Kolbenpumpe anzusteuern. Dazu wird ein Laptop mit dem Programm CoDeSys und die entsprechenden Verbindungskabel benötigt. Der Benutzer gibt die gewählte Hubfrequenz in Hertz in den Laptop ein und das Signal wird über ein USB-Verbindungskabel an die WAGO weitergegeben (siehe Bild 64 und Bild 65). Von dort aus wird das Signal umgewandelt und an die Kolbenpumpe weitergeleitet. Mit diesem Programm kann die Einspeisung der Ölleistung schrittweise angepasst werden. Dies ist wichtig, um später einen autonomen Betrieb ausschließlich mit Heizöl realisieren zu können.

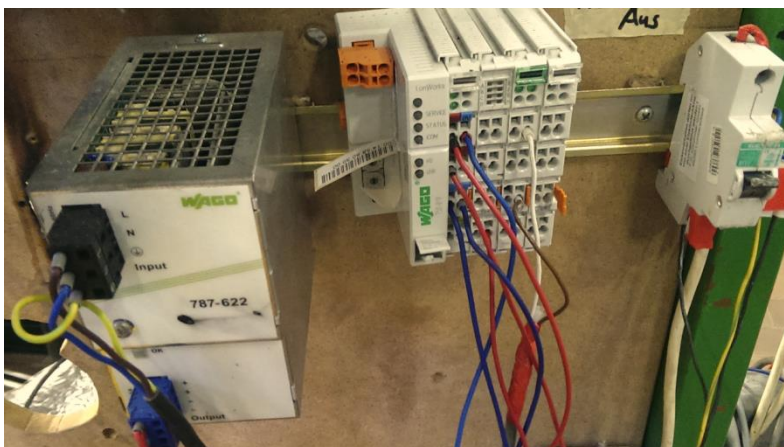


Bild 64: SPS-Steuerung der Firma WAGO

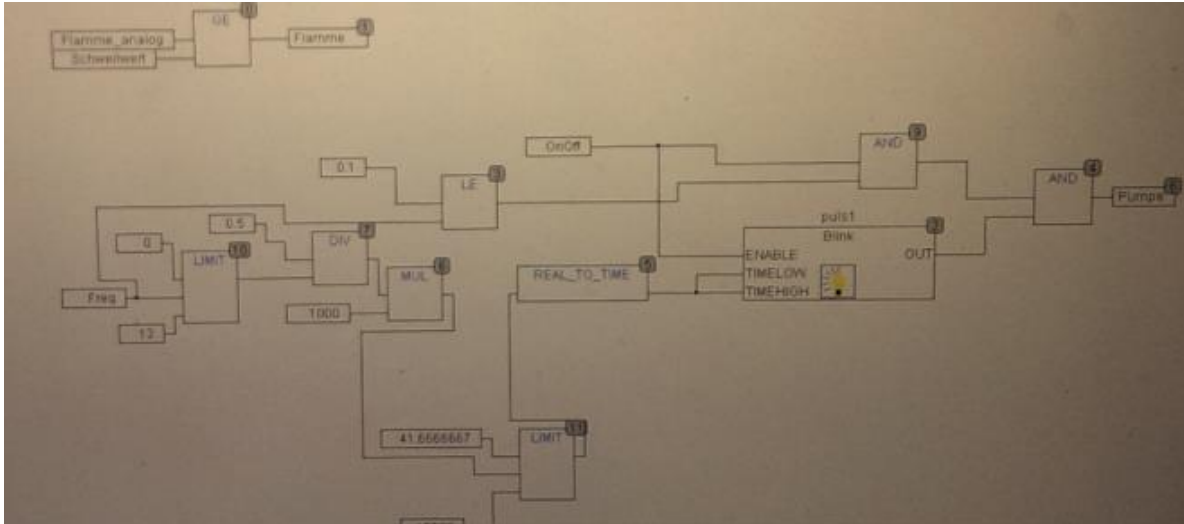


Bild 65: Darstellung der Programmierenebene im Programm CoDeSys

2.4.3.4 Einbettung des Oberflächenbrenners in eine Brennkammerumgebung

Da die Wärmeübertragung an die Spirale durch den bisher untersuchten freibrennenden Brenner (siehe Bild 66) nicht richtig wiedergegeben werden kann, wird ein Stahlrohr als Brennkammerumgebung benutzt. Dieses soll die auftretenden Verbrennungsgase in axiale Richtung kanalisieren, damit der Wärmestrom an der Spirale vorbei geleitet wird (siehe Bild 67). Durch das Kanalisieren der Verbrennungsgase wird die Verdampfung des Öls verbessert. Der Durchmesser des Stahlrohres wird dabei so gewählt, dass er mit dem Durchmesser des Brennraums im oben beschriebenen Versuchsstandes übereinstimmt, um somit Rückschlüsse auf die späteren Brennraumverhältnisse gewinnen zu können.

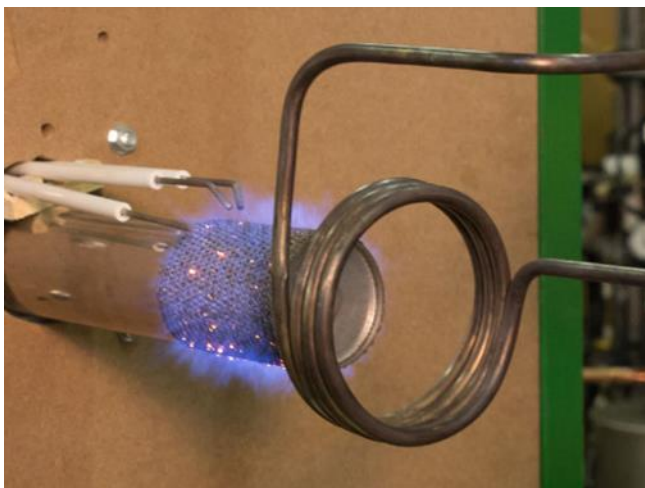


Bild 66: Spirale freihängend, Seitenansicht von links



Bild 67: Innenansicht des Stahlrohres mit Wärmedämmung

An der Rückseite des Brenners ist eine nicht entflammbare Dämmung montiert. Diese soll das Brennergehäuse und dessen Montagewand (Spanplatte) vor thermischer Belastung schützen.

Um eine möglichst gute und gleichbleibende Verdampfung des Öls zu gewährleisten, muss der in Kapitel 2.4.2.1 ermittelte Spiralenabstand eingehalten werden. Um die Spirale möglichst genau nach den Vorgaben anzubringen und während der Versuchsdurchführung zu fixieren, wird eine Halterungsvorrichtung angefertigt (siehe Bild 68). Auf diese Weise kann die Spirale mittig positioniert werden, so dass eine gleichmäßige Wärmeübertragung an die Verdampferspirale gefördert wird.



Bild 68: Darstellung der Spiralenhalterung

Da das in der Spirale verdampfte Heizöl in den Oberflächenbrenner eingeleitet werden muss, um es anschließend in die Verbrennungsluft einzumischen, wird ein Loch in das Brennerrohr eingearbeitet. Durch dieses wird die Ausgangsseite der Spirale in den Innenraum des Brennerrohres eingeführt. Die Durchtrittsöffnung ist vom Ende des Reaktionskörpers (in Strömungsrichtung) ca. 23 cm entfernt (siehe Bild 69). Eine Abdichtung der Durchtrittsöffnung ist erforderlich, da das verdampfte Heizöl aber auch die Verbrennungsluft innerhalb des Brennerrohres unter leichtem Überdruck steht.



Bild 69: Position der Durchtrittsöffnung in das Brennerrohr

2.4.3.5 Realisierung eines autonomen Betriebes

Ein autonomer Betrieb wird erreicht, wenn sich die Ölverdampfung aus der ausschließlichen Ölverbrennung heraus selbst erhält. Dies bedeutet, dass aus der Flamme Wärme ausgekoppelt wird und diese dann an die Spirale übertragen wird, um die Verdampfung des Öls aufrechtzuerhalten.

Wie bereits oben beschrieben, wird in der Startphase Erdgas als Brennstoff genutzt, wobei der Gasvolumenstrom langsam gedrosselt, während der Ölmassenstrom gleichzeitig langsam erhöht wird.

Vorversuche mit Propangas

Da keine nennenswerten Vorkenntnisse über das Betriebsverhalten vorliegen, wird zunächst ein Brennstoff (Propan) verwendet, der unter Normalbedingungen bereits in einer gasförmigen Phase vorliegt. Bei diesem Vorversuch wird das Verhalten des Brenners beim Einleiten eines Sekundärbrennstoffes untersucht. Hierbei wird das Propan aus der Gasflasche heraus über Gasdruckregler und Gasmengenmessung sowie über die Spirale und ein daran anschließendes Kupferrohr in das Brennerrohr geleitet. Das Ende des Rohres ist mit einer Kupferkappe versehen, welche vier x-förmig angeordnete Bohrungen aufweist.

Während der Umstellung von Erdgas auf Flüssiggas gestaltet sich der Versuch unkompliziert und der autonome Betrieb wird sichergestellt. Der Brenner verhält sich ruhig und der Abbrand ist rings um den zylindrischen Reaktionskörper gleichmäßig. Beobachtete Flammenlänge und Flammenfarbe sprechen für eine vollständige Verbrennung mit geringen Abgasemissionen und für einen rußfreien, sauberen Abbrand des Gemisches.

Vorversuch mit Heizöl

Nachdem der Versuchsaufbau mit den Propangasversuchen vorkonfiguriert wurde, wird die Spirale mittels Schläuchen an die Heizölversorgung (Vorratsgefäß, Ölfilter, Kolbenpumpe) angeschlossen.

Zunächst werden der Brenner und die Spirale im Erdgasbetrieb auf Betriebstemperatur gebracht und der Brenner anschließend in Stufe 1 betrieben. Mit einem Laptop und dem zuvor erwähnten Programm *CoDeSys* wird nun die Kolbenpumpe angesteuert und ein kleiner Öl-massenstrom eingeleitet. Dieser beträgt zu Anfang etwa 3 g/min welches ca. 2 kW Leistung entspricht. Auch hier wird der Brenner mit einem Brennstoffgemisch betrieben, welches zunächst einen höheren Anteil an Erdgas besitzt, um den sicheren Betrieb zu gewährleisten. Die Hubfrequenz der Kolbenpumpe wird nun im 10-Sekunden-Takt um 0,1 Hertz hochgefahren, gleichzeitig wird der Erdgasvolumenstrom soweit gedrosselt, dass gerade noch ein sicherer Betrieb gewährleistet werden kann. Dieses Prinzip wird fortgesetzt, bis kein Erdgas mehr erforderlich ist und der Brenner autonom also ausschließlich mit Heizöl betrieben werden kann. Bei diesem Versuch wird auf Abbrand, Flammenlänge, Flammenfärbung und die Flammenbelegung des Metallgewebes geachtet.

Der autonome Betrieb wird bei einer Hubfrequenz der Kolbenpumpe von ca. 4,5 Hertz erreicht, was in etwa einer Ölleistung von 10,6 kW entspricht. Im Vergleich hierzu beträgt die Gasleistung im reinen Erdgasbetrieb 11 kW. Aufgrund der schlechteren Durchmischung von Öl und Verbrennungsluft kommt es örtlich zu sehr unterschiedlichen Brennstoff-Luft-Verhältnissen entlang des Reaktionskörpers.



Bild 70: Öldampfversuch - Flammenbild, -färbung und -länge

Die schlechte Durchmischung macht sich ebenfalls bei Flammenfärbung und der Flammenlänge bemerkbar (siehe Bild 70). Bei der Flammenfärbung wird nun die typische Ölflamme eines Gelbbrenners sichtbar.

Die Flammenlänge ist, im Gegensatz zu einer Gasflamme, deutlich erhöht. Bedingt durch höhere Brennstoffleistung und die schlechtere Durchmischung liegt statt einer Vormischflamme (Erdgas) partiell eine gelb gefärbte und deutlich längere Diffusionsflamme vor.

Darüber hinaus wird aus Bild 70 ersichtlich, dass die Flamme nicht gleichmäßig über den Reaktionskörper verteilt ist. Die Belegung entsprach in etwa 60% der gesamten Fläche und

zeichnete sich, wie in Bild 71 dargestellt, ab. Das beobachtete Flammenbild deutet darauf hin, dass Auftriebskräfte auf den heißen Öldampf wirken.



Bild 71: Schematische Darstellung der Flammenbelegung

Der schraffierte Bereich in Bild 71 kennzeichnet dabei den Teil der Oberfläche, auf dem eine Verbrennungsreaktion stattfindet. Im weiß hinterlegten Bereich des Reaktionskörpers zeigen sich kalte Stellen. Flammen sind an dieser Stelle kaum bis gar nicht ersichtlich und es entwickelt sich Rauch von unverbranntem Ölnebel, der zudem zu Rußablagerungen führt.

2.4.3.6 Optimierung der Verbrennung

Um die Durchmischung von Öldampf und Verbrennungsluft zu verbessern, sollen im Folgenden Umbaumaßnahmen untersucht und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit beurteilt werden. Hierbei erfolgen keine Messungen von Schadstoffemissionen, sondern es wird lediglich anhand von beobachtbaren Flammeneigenschaften qualitativ beurteilt, ob sich die Durchmischung verbessert hat. Zu diesen Eigenschaften gehören:

- Flammenlänge
- Abbrand
- Flammenfärbung
- Flammenbelegung

Als Referenz für die qualitative Beurteilung dient die ursprüngliche Gasflamme des Brenners, da hier eine gute Durchmischung bzw. Verbrennung vorliegt und damit gute Abgaswerte und geringe Emissionen sichergestellt sind (siehe Bild 72).



Bild 72: Flammenbild des Oberflächenbrenners im Erdgasbetrieb

Drallkörper

Um eine verbesserte Durchmischung zu erhalten, wird zunächst ein Drallkörper montiert (siehe Bild 73). Dieser soll das heranströmende Gemisch in Rotation versetzen.

Durch die Drallschlitze kann die vom Gebläse erzeugte Druckenergie in zusätzliche Bewegungsenergie umgewandelt werden, wodurch mehr Verwirbelungen im Gemisch entstehen. Diese kleineren und größeren Verwirbelungen sollen für eine bessere Durchmischung sorgen. Dieses wird durch die in der Mitte montierte Staubscheibe unterstützt, weil sie einen Großteil der Fläche blockiert und die heranströmende Luft durch den Drallkörper zwingt.

Bei einem ersten Versuch wird die Distanz zwischen Drallkörper und Ende des Reaktionskörpers maximiert, so dass dem Gemisch möglichst viel Zeit zur Verfügung steht, sich zu durchmischen.



Bild 73: Darstellung des Drallkörpers

Die Anordnung des Drallkörpers innerhalb des Oberflächenbrenners ist in Bild 74 dargestellt.

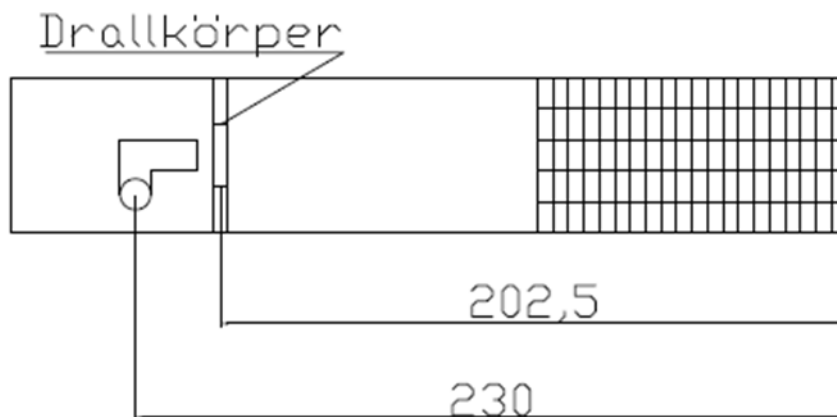


Bild 74: Anordnung des Drallkörpers innerhalb des Oberflächenbrenners

Bild 75 zeigt deutlich, dass sich die Qualität der Verbrennung nicht verbessert hat. Die Flammenlänge ist im oberen Bereich des Reaktionskörpers deutlich zu hoch, die Flamme weist einen hohen diffusiven Anteil auf. Darüber hinaus ist die Verbrennungszone sehr ungleichmäßig über den Reaktionskörper verteilt. Offensichtlich werden die Auftriebskräfte durch diese Einbaugeometrie nicht kompensiert.



Bild 75: Durchmischung bei Einsatz eines Drallkörpers

Auch eine Veränderung der Position des Drallkörpers hin zum Reaktionskörper (siehe Bild 76) führt zu keiner signifikanten Verbesserung des Flammenbildes.

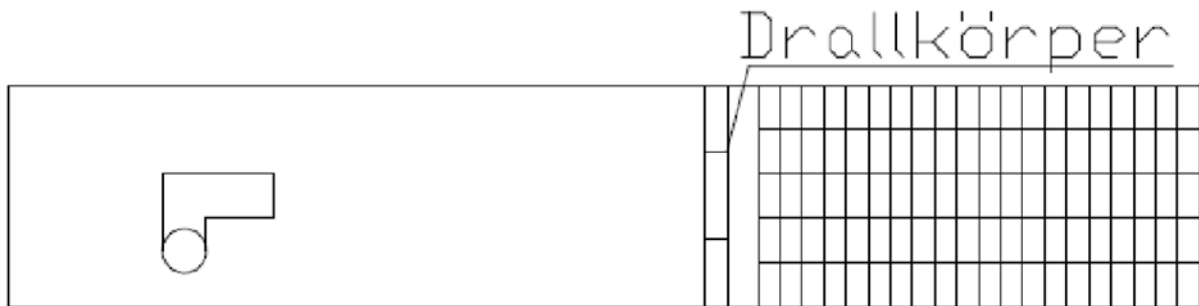


Bild 76: Anordnung des verschobenen Drallkörpers

Durch die Veränderung des Mischungsweges wird der diffusive Anteil der Flamme lediglich um einen bestimmten Winkel gedreht.

Variation der Position des Öldampf-Auslasses

In einem weiteren Versuch wird, um dem Auftriebseffekt entgegenzuwirken, der Auslass für den Öldampf weiter stromabwärts in Richtung Drallkörper positioniert. Hierzu wird das innenliegende Kupferrohr, welches den Öldampf einleitet, verlängert. Als Auslass wird weiterhin eine Kupferkappe mit vier Auslässen, welche x-förmig angeordnet sind, verwendet.

Der Auftriebseffekt wird in diesem Versuch wie gewollt zwar deutlich reduziert, aber die Durchmischung ist im Gesamtbild wesentlich schlechter geworden.

Es bilden sich vier Abbrandzonen ausgehend vom Metallgewebe des Reaktionskörpers (siehe Bild 77). Bedingt durch die kurze Distanz zwischen dem Öldampf-Auslass und dem Metallgewebe gerät die Mischstrecke wesentlich zu kurz, sodass es der Öldampf direkt durch das Metallgewebe hindurchdringt und sich nicht in ausreichender Weise mit dem Luftstrom durchmischen kann. Trotz des schlechten Abbrandverhaltens wird ein autonomer Betrieb erreicht.

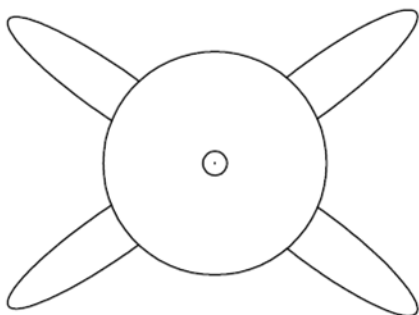


Bild 77: Schematisches Flammenbild bei späterer Öleinleitung (Vorderansicht)

Volumenstromaufteilung

Da in den vorangegangenen Versuchen der Auftrieb eine grundlegende Problematik darstellt, wird im Folgenden versucht, den Volumenstrom des Öldampf-Luft-Gemisches zu teilen. Dazu wird ein Leitblech in den Reaktionskörper eingebracht, welches in Bild 78 dargestellt ist.



Bild 78: Leitbleches zur Teilung des Volumenstroms

Dieses Leitblech soll sowohl den Auftriebseffekt verhindern, als auch im unteren Bereich des Metallgewebes für eine stärkere Flammenbelegung sorgen. Infolge der Volumenstromaufteilung sollten bessere Voraussetzungen dafür vorliegen, dass sich die Komponenten Öldampf und Verbrennungsluft mischen. Der oben genannte x-förmige Auslass und der Drallkörper werden weiterhin eingesetzt (siehe Bild 79).

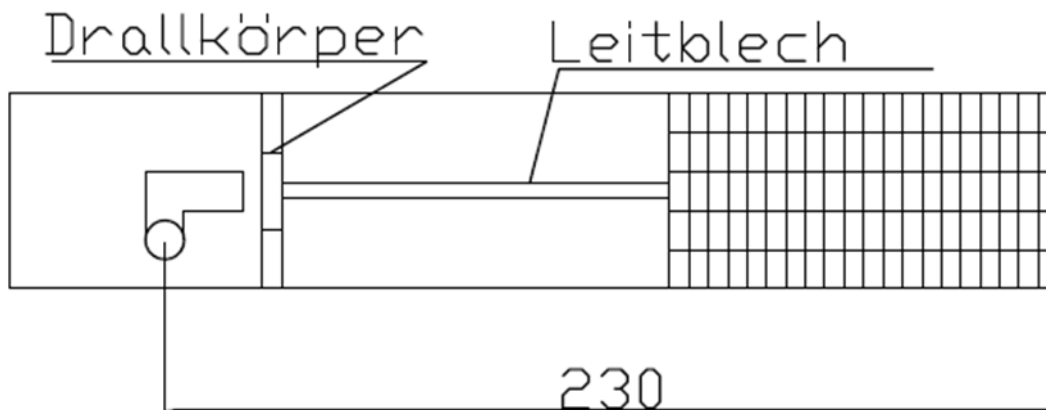


Bild 79: Anordnung des Leitbleches zur Aufteilung des Volumenstroms

Auch bei dieser Versuchsanordnung ist der Abbrand nicht wie gewünscht gleichmäßig um den Reaktionskörper verteilt. Es entstehen lokal längere Diffusionsflammen, die aber nicht so stark ausgeprägt sind wie in den vorangegangenen Versuchen. Insgesamt wird der Auftriebseffekt minimal reduziert, aber nicht vollständig unterbunden. Außerdem erweist sich die Masse des Leitbleches als Problem, da hierdurch die Rekondensation des Öldampfes gefördert wird, so dass sporadisch kleine Diffusionsflammen am unteren Ende des Metallgewebes erscheinen.

Festzustellen ist bei autonomem Betrieb eine deutlich verbesserte Flammenbelegung (ca. 70% des Metallgewebes). Veränderungen der Auslassgeometrie und der Position des Drallkörpers (siehe Bild 80) führen zu keiner weiteren Verbesserung des insgesamt nicht zufriedenstellenden Flammenbildes.

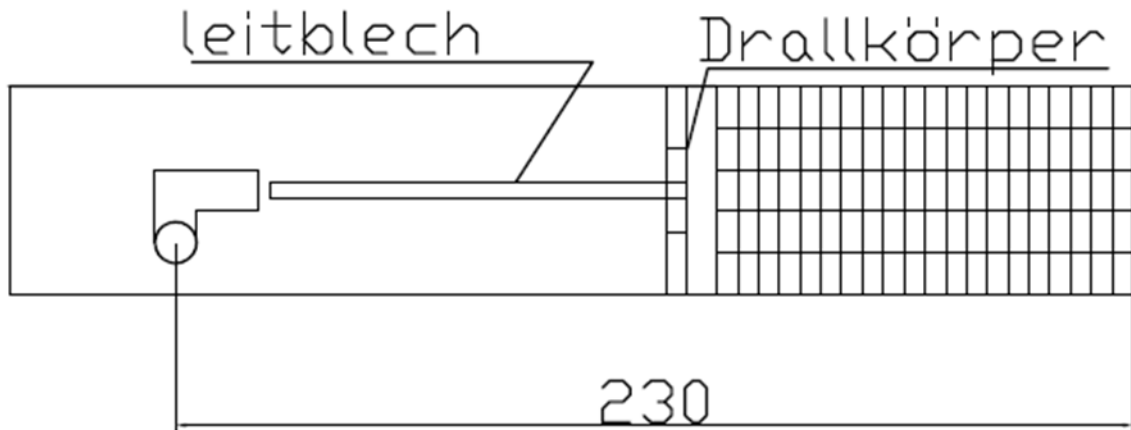


Bild 80: Veränderte Position de Drallkörpers beim Volumenstromaufteilungsversuch

Gasdüse mit Öffnungsdurchmesser $d = 1\text{mm}$

Da die vorangegangenen Versuche, die alle auf einem x-förmigen Öldampf-Auslass fußten, nur unbefriedigende Ergebnisse lieferten, wird die Auslassgeometrie verändert. Als Auslass wird nun eine Gasdüse (siehe Bild 81) mit einem Öffnungsdurchmesser von 1mm verwendet, die in einem Abstand von 5 cm zum Drallkörper montiert wird (siehe Bild 82).



Bild 81: Gasdüse zur Öldampfeinleitung

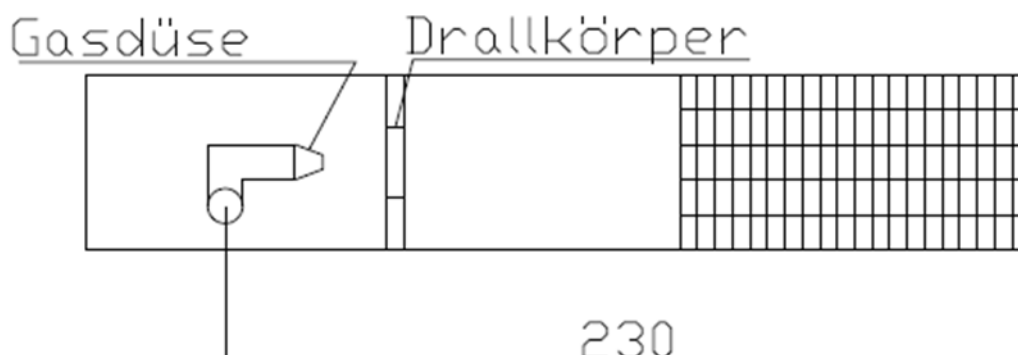


Bild 82: Anordnung der Gasdüse im Brennerrohr

Die Idee hierbei ist, den Ölnebel, analog zu den Verhältnissen bei Flüssiggasbrennern, der Gasdüse mit erhöhtem Vordruck zuzuführen, so dass dieser mit hohem Impulsstrom aus der Gasdüse austritt, dabei Verbrennungsluft ansaugt und sich anschließend mit dieser innerhalb des Brennerrohres vermischt. Die Versuchsreihen sind zunächst nicht zufriedenstellend verlaufen, das heißt, es konnte kein autonomer Betrieb realisiert werden, wobei die gesamten Bauteile im Brennerrohr verrußten. (Anmerkung: im Anschluss durchgeführte Berechnungen zeigten, dass der Durchmesser der gewählten Gasdüse deutlich zu klein war). Ein in späteren Versuchsreihen verwendete Gasdüse mit größerem Durchmesser ermöglichte einen autonomen Betrieb ohne Rußerscheinungen).

Stahlgewebe

Da die letzte Versuchsreihe (Gasdüse) in der oben beschriebenen Konstellation nicht den gewünschten Erfolg erzielte, wird in der nächsten Versuchsreihe ein Stahlgewebe in das Brennerrohr integriert. Durch den Einsatz dieses Gewebes soll die Durchmischung durch intensive Wirbelbildung verbessert werden. Zur Öldampfeinleitung wird wieder der x-förmige Auslass mit Drallkörper verwendet, da diese Kombination die bisher besten Ergebnisse erzielt hat.

Der neue Versuchsaufbau besteht aus einem handelsüblichen Stahlgewebebeschwamm, der unter anderem auch als Stahlwolle bezeichnet wird (siehe Bild 83). Die Anordnung innerhalb des Brennerrohres zeigt Bild 84. Das Stahlgewebe wird in einem Abstand von ca. 5 cm zum Auslass platziert und der Drallkörper wird in Strömungsrichtung unmittelbar vor dem Stahlgewebe montiert, um den größtmöglichen Mischungseffekt zu erzielen.

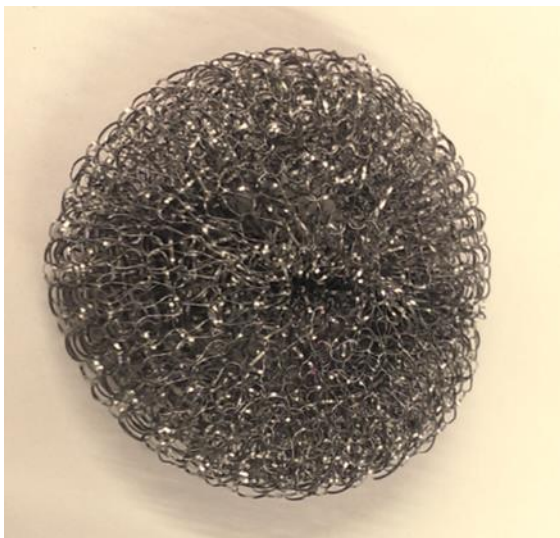


Bild 83: Verwendetes Stahlgewebe

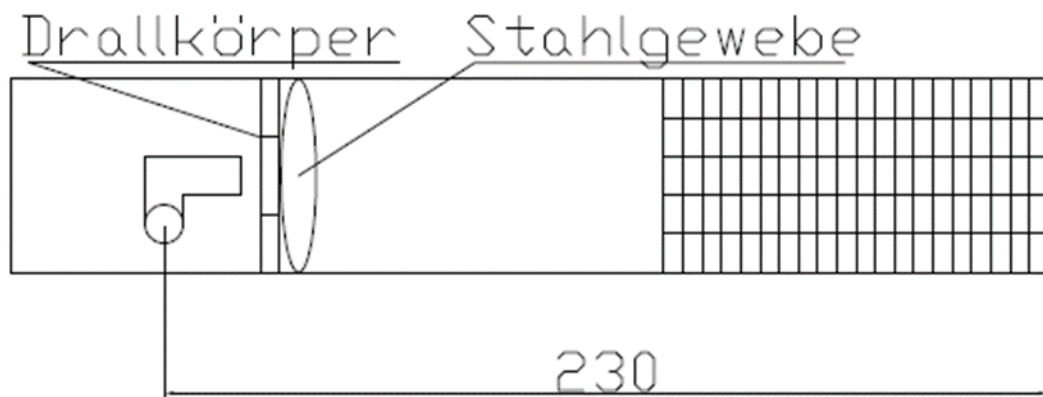


Bild 84: Anordnung von Stahlgewebe und Drallkörper im Brennerrohr

Um den Brenner autonom betreiben zu können, ist zunächst eine Hubfrequenz der Kolbenpumpe von mehr als 5 Hertz erforderlich, die aber im Laufe des Versuchsbetriebes auf 4,5 Hertz gedrosselt werden kann, ohne den autonomen Betrieb zu unterbrechen. Insgesamt stellt sich die Verbrennung stabiler als in allen vorangegangenen Versuchsreihen dar. Dieses wird auch am Verbrennungsbild sichtbar (siehe Bild 85).



Bild 85: Darstellung der Verbrennung mit Stahlgewebeeinbau

Die Belegung der Oberfläche am Reaktionskörper beträgt ca. 70 – 80%.

Die Flammenfärbung zeigt jedoch weiterhin eine asymmetrische Verteilung, sichtbar dadurch, dass auf der linken Seite des Reaktionskörpers eine gelbe, auf der rechten Seite hingegen eine bläuliche Flammenfärbung zu beobachten ist (siehe Bild 85). Zudem treten zwischenzeitlich periodisch wiederkehrend Diffusionsflammen auf, die auf eine Rekondensa-

tion des Öldampfes im Brennerrohr hindeuten. Nach Öffnen des Brennerrohres zeigten sich Reste flüssigen Heizöls innerhalb des Stahlgewebes.

Gasdüse mit Öffnungsdurchmesser $d = 2,2\text{mm}$

Im Anschluss durchgeführte Berechnungen zeigten, dass der Durchmesser der gewählten Gasdüse (siehe oben) deutlich zu klein war. Daher wird der Düsendurchmesser sukzessive vergrößert, um die optimale Konfiguration zu ermitteln. Zur Beurteilung des Impulsstromes des aus der Gasdüse austretenden Öldampfes und somit seiner Fähigkeit, Verbrennungsluft anzusaugen, um sich anschließend mit ihr zu vermischen, wird der Vordruck in der Zuführungsleitung des Öldampfes messtechnisch erfasst. Aus dem DVGW-Regelwerk ist bekannt, dass sich bei Verwendung von Flüssiggas (Propan, Butan) Vordrücke von ca. 50 - 60mbar bewährt haben. Ausgehend von einem Düsendurchmesser von 1mm wird versucht, einen Ölmassenstrom von ca. 15 g/min entsprechend 0,9kg/h (10,6 kW) zu realisieren. Dieser Öldurchsatz entspricht einer Hubfrequenz der Kolbenpumpe von 4,5 Hertz (siehe Bild 32).

Die in Bild 81 dargestellte Gasdüse wird ersetzt durch eine flexibler handhabbare Lanze mit aufgesetztem Messingkopf variablen Bohrungsdurchmessers. Die Verwendung von Bohrungsdurchmessern zwischen 1,0 bis 2,0 mm erforderten beim o.a. Ölmassenstrom Vordrücke von weit über 60mbar. Erst ab einem Bohrungsdurchmesser von 2,2 mm stellte sich ein Vordruck von 50 bis 60 mbar ein. Unter diesen Bedingungen wird der autonome Betrieb ohne Rußerscheinungen erreicht. Die Flammenverteilung auf dem Reaktionskörper ist weitestgehend gleichmäßig. Eine weitere Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers ($\geq 2,3\text{ mm}$) führte bei gleichem Ölmassenstrom zum Absinken des Vordruckes auf Werte unterhalb von 45 mbar und hatte eine schlechtere Flammenverteilung auf dem Reaktionskörper zur Folge. Für die folgenden Emissionsmessungen wird daher auf diese Konfiguration zurückgegriffen.

2.4.4 Emissionsverhalten des Oberflächenbrenners

Vorerst abschließend wird der oben beschriebene Prototyp des Oberflächenbrenners (Zuführung des Öldampfes über Gasdüse 2,2 mm) an die oben beschriebene speicherintegrierte Brennkammer (Bild 1, Kap. 1.2) angeschlossen. Der Startbetrieb erfolgt zunächst auf der Basis von Erdgas. Über ein Feinreguliertventil wird stufenweise der Heizölanteil bei konstant bleibender Brennerleistung und entsprechend zurückgefahrener Erdgasmenge hochgefahren, bis der Heizölanteil schließlich bei autothermem Betrieb 100 % erreicht. Ausgehend von einem NO_x -Emissionswert von ca. 40 mg(kWh) bei reinem Erdgasbetrieb steigt dieser bei Zugabe von verdampftem Heizöl zunächst auf 100 mg/kWh (O_2 -Gehalt 4 Vol.-%) an, um sich dann bei höheren Heizölanteilen bei ca. 95 mg/kWh (O_2 -Gehalt 6 Vol.-%) zu stabilisieren (siehe Bild 86).

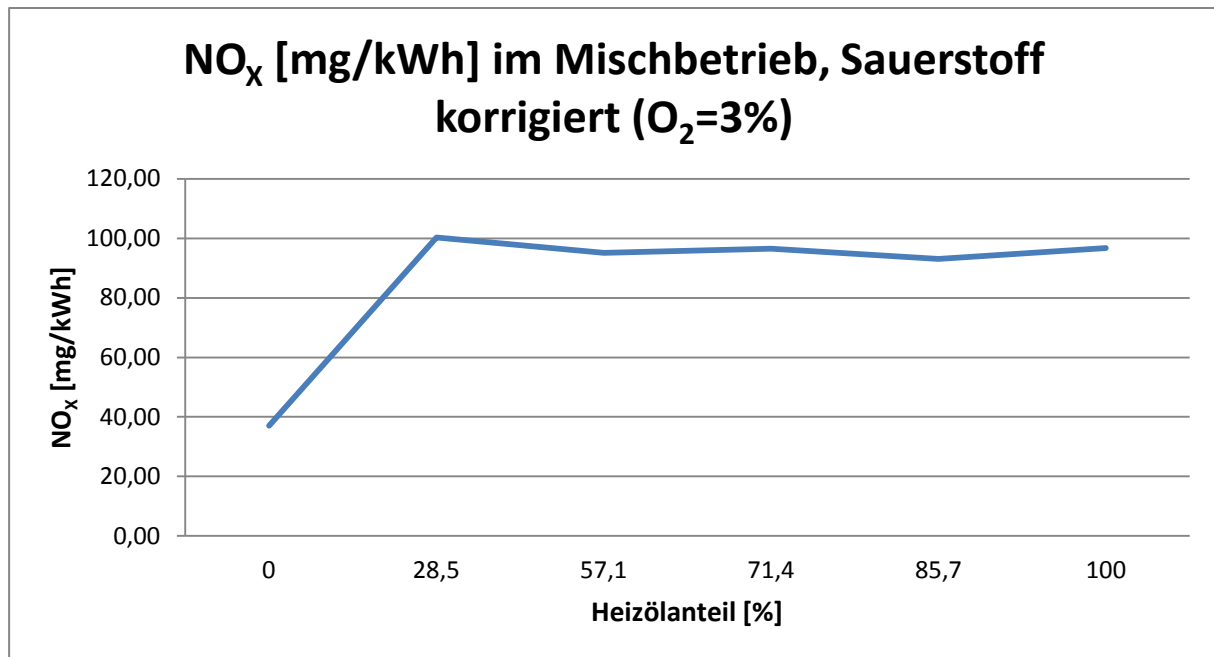


Bild 86: Stickoxidemission in Abhängigkeit vom Heizölanteil im zugeführten Brennstoff

Die parallel dazu gemessenen Kohlenmonoxidemissionen steigen ausgehend von einem CO-Emissionswert von ca. 40 mg(kWh) bei reinem Erdgasbetrieb mit zunehmendem Heizölanteil auf ca. 2.000 mg/kWh (siehe Bild 87). Dieser Wert liegt deutlich über den nach deutschem Recht und Regelwerk zulässigen Grenzwerten. Dieser Befund ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die oben beschriebene noch nicht optimale Flammenverteilung auf dem Reaktionskörper zurückzuführen, die wiederum zur Bildung lokaler Verbrennungsstrahlen führt. Beim Anschlagen dieser Strahlen an die kalte Brennkammerwand bildet sich in starkem Maße Kohlenmonoxid. An dieser Stelle ist weitere Entwicklungsarbeit zu leisten. Ansatzpunkt für die Lösung dieses Problems ist eine genaue Positionierung der Gasdüse zur Aufgabe des Heizöldampfes im Mischrohr sowie eine Verbesserung der Verbrennungsbedingungen durch Anbringung eines Flammenrohres innerhalb der Brennkammer. Diese Untersuchungen sind Gegenstand eines zurzeit (Stand Juli 2015) laufenden Vertiefungsprojektes und einer daran anschließenden Bachelorarbeit.

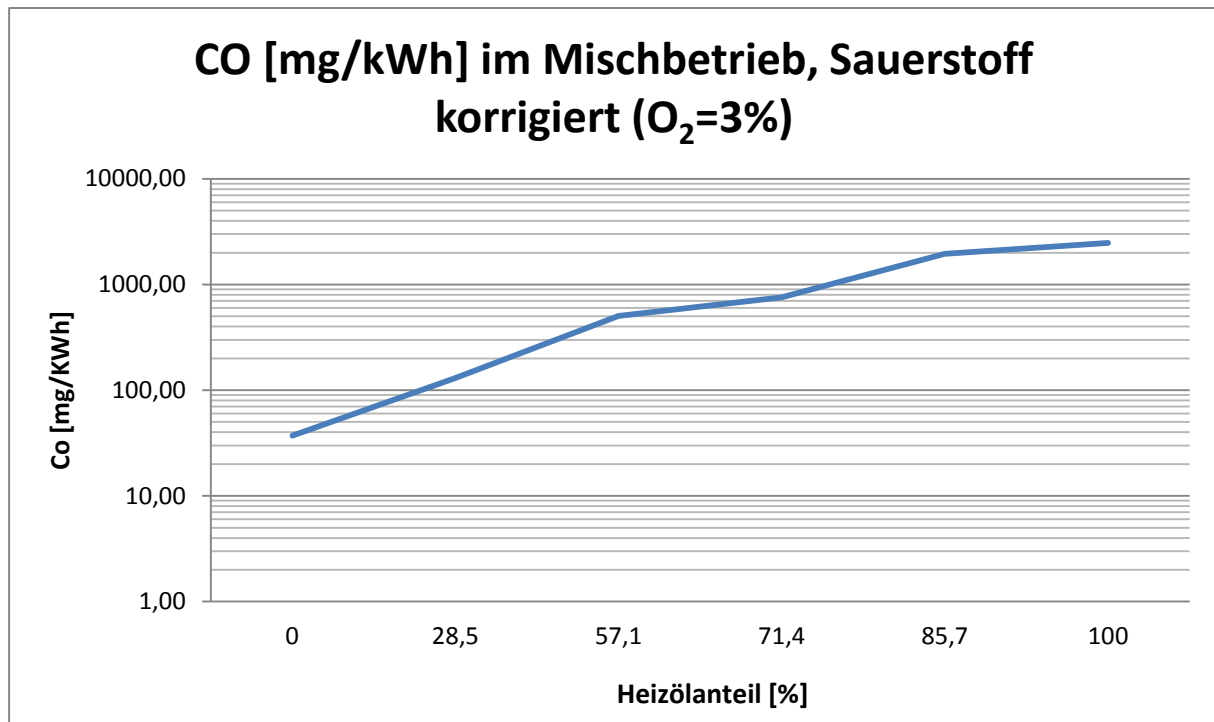


Bild 87: Kohlenmonoxidemission in Abhängigkeit vom Heizölanteil im zugeführten Brennstoff

3 Verwendung der Zuwendung

Details über die Verwendung der Mittel im Projekt wurden bereits von der Administration der Ostfalia HaW beim Projektträger vorgelegt.

Wie in jedem ähnlichen Projekt stellen die Personalkosten für wissenschaftliche Mitarbeiter den größten Finanzposten dar. Insgesamt wurde für Personal geringfügig mehr ausgegeben als geplant und für Geschäftsbedarf und Dienstreisen deutlich weniger als geplant. Die übrigen Ausgaben lagen in etwa im Plan.

4 **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Zur Durchführung des Projektes waren die Ausgaben notwendig und angemessen. Wie bereits ausgeführt liegt der Hauptbetrag der Ausgaben in den Personalkosten. Die Notwendigkeit der Beschäftigung von wissenschaftlichen Mitarbeitern für ein derartiges Projekt ist unbestritten. Die Angemessenheit seiner Bezahlung ist durch Tarifverträge bis ins Einzelne geregelt.

Inhaltlich bestand ebenfalls eine klare Notwendigkeit für das Projekt. Mit der Verringerung des Energiebedarfs für Heizen und Warmwasserbereitung auf der einen Seite und der sich öffnenden Schere zwischen erforderlicher Brennerleistung zur Heizwärme- bzw. Warmwasserbereitstellung im Neubaubereich sowie im energetisch sanierten Gebäudebestand auf der anderen Seite stellen sich neue Herausforderungen an die Modulationsfähigkeit von Brennern für Flüssigbrennstoffe. Die zunehmende Sensibilisierung der Bevölkerung für Lebensqualität verbessernde Umweltschutzmaßnahmen verlangt zudem Systeme zur Wärmebereitstellung mit schadstoffminimierten Verbrennungsprozessen.

5 **Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit**

Ostfalia HaW

Durch das Forschungsvorhaben wurden die Kompetenz und das Know-How wesentlich erweitert und die Kontakte und das Netzwerk zwischen den Projektpartnern gefestigt. Diese Kontakte werden auch in der Zukunft weiter belastbar bleiben.

Es erfolgte eine Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses durch Einbindung von Studierenden in Form von zu erstellenden Abschlussarbeiten und studentischen Hilfskräften. Im Forschungsprojekt wurden insgesamt drei studentische Arbeiten angefertigt, zwei weitere befinden sich derzeit (Stand Juli 2015) in der Anfertigung. Diese Personen tragen die gewonnenen Erkenntnisse weiter in andere Forschungseinrichtungen und in die Industrie. Darüber hinaus wurden die Forschungsergebnisse an der Ostfalia und der TU Braunschweig für die Ausbildung der Studierenden genutzt. Vorausgesetzt, dass die oben genannten Verbesserungsmaßnahmen am Oberflächenbrenner erfolgreich sind, ist geplant, zusammen mit dem Kooperationspartner Fa. Herrmann ein Anschlussvorhaben im ZIM-Programm des BMWi zu beantragen.

Fa. Herrmann GmbH & Co. KG

Zum Know-how Transfer von der Ostfalia zum Kooperationspartner wurden Schulungsmaßnahmen durchgeführt, um die Mitarbeiter über den Aufbau und die Funktionsweise von Simulationstechniken sowie deren speziellen Einsatz in diesem Projekt zu unterrichten. Durch die intensive Zusammenarbeit während des Projektes ergab sich darüber hinaus ein gewisser Erfahrungsaustausch. Über die Projektmanagement-Software „Alfresco“ des Rechenzentrums der Ostfalia hatte Fa. Herrmann jederzeit Einblick in die Protokolle der wöchentlich durchgeführten Projektbesprechungen sowie in die dafür erstellten Unterlagen (Fotos, Videos, Messberichte). Die Kombination des entwickelten Verdampfungsverfahrens mit einem vormischenden Flächenbrenner ist aus Sicht des Partners sehr erfolgsversprechend. Denn damit würde die Möglichkeit der Dosierung kleinster Brennstoffmassenströme mit den ver-

fahrenstechnischen Vorteilen eines Flächenbrennersystems verknüpft. Aufgrund der im Abschlussbericht beschriebenen Ergebnisse und Probleme kann noch keine unmittelbare Nutzung erfolgen. Vorausgesetzt, dass die oben genannten Verbesserungsmaßnahmen am Oberflächenbrenner erfolgreich sind, ist geplant, zusammen mit dem Kooperationspartner Fa. Herrmann ein Anschlussvorhaben im ZIM-Programm des BMWi zu beantragen.

Fa. Solvis GmbH & Co. KG

Zum Know-how Transfer von der Ostfalia zum Kooperationspartner wurden auch im Hinblick Fa. Solvis Schulungsmaßnahmen durchgeführt, um die Mitarbeiter über den Aufbau und die Funktionsweise von Simulationstechniken sowie deren speziellen Einsatz in diesem Projekt zu unterrichten. Durch die intensive Zusammenarbeit während des Projektes ergab sich darüber hinaus ein gewisser Erfahrungsaustausch. Bedingt durch die Entwicklung des Marktes ist festzustellen, dass sich das Interesse des Kooperationspartners hin zu Systemen mit Oberflächenbrennern verlagert hat. Diesbezüglich findet eine direkte Zusammenarbeit mit Fa. Herrmann statt.

6 Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Bereits seit ca. 10 Jahren arbeitet die Fraunhofer Gesellschaft (ISE) in Freiburg an einem Verfahren zur katalytischen Verdampfung von Dieseldieselkraftstoff und Heizöl. Im Rahmen eines sich zeitlich mit diesem Vorhaben überschneidenden Forschungsvorhabens arbeitet Fa. Herrmann mit dieser Forschungsstelle zusammen. Seitens Fa. Herrmann wurde als Nachteil dieses Verfahrens der Einsatz hochwertiger und damit teurer Katalysatormaterialien genannt, der einen kommerziellen Einsatz in der Heiztechnik fraglich erscheinen lässt.

Weitere Informationen finden sich auf:

http://www.h2fc-fair.com/hm07/images/exhibitors/INFO_Diesel-Verdampfung_07-04_100dpi.pdf

und

<http://www.enob.info/de/neue-technologien/projekt/details/emissionsarmer-oeldampf-brenner-fuer-modulierende-heizsysteme/>

7 Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Schematische Darstellung eines ölgefeuerten, speicherintegrierten Wärmeerzeugers zur Bereitstellung von Warm- und Heizwasser; Quelle: SOLVIS GmbH & Co KG	6
Bild 2: Balkenplan zum Vorhaben „Schadstoffminimierte Verbrennung für flüssige Brennstoffe unter Zugrundelegung eines vollautomatischen Brennerbetriebes“	13
Bild 3: Stabilitätsbereiche (schematisch) nach /F15/.....	16
Bild 4: Stickoxidemissionen des neuartigen Ölbrenners in Abhängigkeit von der Feuerungswärmeleistung	17
Bild 5: Zylindrischer Oberflächenbrenner im sogenannten Strahlungsbetrieb /F40/	19
Bild 6: Funktionsprinzip eines Porenbrenners /F36/.....	20
Bild 7: Funktionsschema des PyrlInnobrenners /F34/.....	21
Bild 8: Schnittzeichnung des Prototyps eines zylindrischen Oberflächenbrenners /F40/.....	22
Bild 9: Schrittmotorankopplung an den Brenner	28
Bild 10: Hexaedrisch vernetzte Geometrie im Halbschnitt	30
Bild 11: Geschwindigkeitsprofil in der kaldurchströmten Brennkammer	30
Bild 12: Temperaturverteilung in der adiabaten Brennkammer (Schnitt in axialer Richtung) nach initialer Flammenbildung.....	31
Bild 13: Temperaturverteilung in der nicht-adiabaten Brennkammer mit vereinfachten Randbedingungen im stationären Zustand	32
Bild 14: Flammenform (Isothermenfläche) bei stationärer Simulation	33
Bild 15: Ergebnis des ersten Optimierungslaufes, Ursprungsgeometrie gestrichelt, verschobene Geometrie und Freiheitsgrade mit roten Markierungen.....	34
Bild 16: Ergebnis des zweiten Optimierungslaufes mit Nebenbedingungen, Ursprungsgeometrie gestrichelt, verschobene Geometrie und Freiheitsgrade mit roten Markierungen	34
Bild 17: Ergebnis des adjungierten Verfahrens, nur der blaue Bereich gehört noch zum Fluid, rote Bereiche sind für das Fluid nicht durchdringbar	35
Bild 18: Formoptimiertes Flammenrohr mit düsenförmiger Einschnürung	35
Bild 19: Drallkörper mit einem Drallwinkel von 24°	36
Bild 20: Zeitliche Änderung des Druckverlustes über der Verdampferspirale.....	37
Bild 21: Drift der CO ₂ - Werte im Abgas durch Verkokung der Verdampferspirale	38
Bild 22: NO _x -Werte für 100er Flammenrohr 0,2USgal/h 60° Düse, Drallwinkel 24° und Sekundärluftröhrchen	39
Bild 23: CO-Werte für 100er Flammenrohr 0,2USgal/h 60° Düse, Drallwinkel 24° und Sekundärluftröhrchen	40
Bild 24: Schaltplan Motor /F51/ Tabelle 4: Angeschlossene Pins des Motors.....	41
Bild 25: Automatisierung des Schrittmotors	42
Bild 26: Automatisierung des Schrittmotors Richtungswahl	42
Bild 27: Automatisierung des Schrittmotors Richtungszählung	43
Bild 28: Automatisierung des Schrittmotors - Vergleich zu Bild 25.....	43
Bild 29: Automatisierung des Schrittmotors Richtungswahl - Vergleich zu Bild 26.....	44
Bild 30: Automatisierung des Nadelventils im Sekundärkreis.....	44
Bild 31: Hubkolbenpumpe des Sekundärkreislaufes.....	45
Bild 32: Durchflusskennlinie der eingesetzten Hubkolbenpumpe.....	45
Bild 33: Eingestellt Sicherheitsparameter für den digitalen Feuerungsautomaten im Programm CMLab für CM 12x.....	46
Bild 34: Verfahrensschema der Brennersteuerung	47

Bild 35: Erweitertes Verfahrensschema für die Aufprägung von Lastprofilen auf das Heizsystem.....	48
Bild 36: Tageslastgang (Heizung – Mehrfamilienhaus) mit überlagertem Warmwasserprofil	49
Bild 37: Resultierender Brennstoffmassenstrom aus dem aufgeprägten Tageslastgang mit überlagertem Warmwasserprofil.....	50
Bild 38: Tagesverlauf der gemessenen Sauerstoffkonzentration im Abgas (mit Stillstandszeiten).....	51
Bild 39: Tagesverlauf der gemessenen Stickoxidemissionen im Abgas (mit Stillstandszeiten, nicht sauerstoffkorrigiert).....	51
Bild 40: Tagesverlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen im Abgas (mit Stillstandszeiten, nicht sauerstoffkorrigiert).....	52
Bild 41: Tagesverlauf der gemessenen Sauerstoffkonzentration im Abgas (ohne Stillstandszeiten).....	53
Bild 42: Tagesverlauf der gemessenen Stickoxidemissionen im Abgas (mit Stillstandszeiten, nicht sauerstoffkorrigiert).....	53
Bild 43: Tagesverlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen im Abgas (ohne Stillstandszeiten, nicht sauerstoffkorrigiert).....	54
Bild 44: Verlauf der gemessenen Stickoxidemissionen während der Aufheizphase (1. Abschnitt: t = 2 sec bis t = 45 min).....	54
Bild 45: Verlauf der gemessenen Stickoxidemissionen während der Aufheizphase (2. Abschnitt: t = 60 min bis t = 105 min).....	55
Bild 46: Verlauf der gemessenen Stickoxidemissionen während der Aufheizphase (3. Abschnitt: t = 135 min bis t = 165 min).....	55
Bild 47: Verlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen während der Aufheizphase (1. Abschnitt: t = 2 sec bis t = 45 min).....	56
Bild 48: Verlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen während der Aufheizphase (2. Abschnitt: t = 60 min bis t = 105 min).....	56
Bild 49: Verlauf der gemessenen Kohlenmonoxidemissionen während der Aufheizphase (3. Abschnitt: t = 135 min bis t = 165 min).....	57
Bild 50: Darstellung von Reaktionskörpern /F52/.....	57
Bild 51: Abbrand am Reaktionskörper (Teilausschnitt) /5/.....	58
Bild 52: Versuchsaufbau des Oberflächenbrenners als mobile Freiluftanlage.....	59
Bild 53: Ansicht der integrierten Verdampferspirale mit Oberflächenbrenner.....	59
Bild 54: Darstellung des Geschwindigkeitsfeldes in einem Viertel der Fluiddomäne. Die roten Bauteile sind Lochblende, Prallscheibe, Öllanze mit Einströmungsöffnung in das Brennerrohr (von links nach rechts).....	60
Bild 55: Ergebnis der Mehrzieloptimierung, alle simulierten Entwürfe und Ausbildung der Paretofront.....	61
Bild 56: Markierte Entwurfspunkte auf der Paretofront mit Entwurfsnummern.....	61
Bild 57: Lauf 72 – (links) Geschwindigkeitsfeld und Druckverteilung in der Fluiddomäne, (rechts) Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilung auf dem Auslass.....	62
Bild 58: Lauf 165 – (links) Geschwindigkeitsfeld und Druckverteilung in der Fluiddomäne, (rechts) Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilung auf dem Auslass.....	62
Bild 59: Lauf 398 – (links) Geschwindigkeitsfeld und Druckverteilung in der Fluiddomäne, (rechts) Konzentrations- und Geschwindigkeitsverteilung auf dem Auslass.....	63
Bild 60: Versuchsaufbau zur Ermittlung des optimalen Spiralenabstandes.....	64
Bild 61: Positionierung der Verdampferspirale.....	65
Bild 62: Durchflusskennlinie der Kolbenpumpe in Abhängigkeit von der Hubfrequenz.....	65

Bild 63: Kolbenpumpe	66
Bild 64: SPS-Steuerung der Firma WAGO	66
Bild 65: Darstellung der Programmierenebene im Programm CoDeSys	67
Bild 66: Spirale freihängend, Seitenansicht von links.....	67
Bild 67: Innenansicht des Stahlrohres mit Wärmedämmung.....	68
Bild 68: Darstellung der Spiralenhalterung.....	68
Bild 69: Position der Durchtrittsöffnung in das Brennerrohr	69
Bild 70: Öldampfversuch - Flammenbild, -färbung und -länge	70
Bild 71: Schematische Darstellung der Flammenbelegung.....	71
Bild 72: Flammenbild des Oberflächenbrenners im Erdgasbetrieb	72
Bild 73: Darstellung des Drallkörpers.....	72
Bild 74: Anordnung des Drallkörpers innerhalb des Oberflächenbrenners	73
Bild 75: Durchmischung bei Einsatz eines Drallkörpers	73
Bild 76: Anordnung des verschobenen Drallkörpers	74
Bild 77: Schematisches Flammenbild bei späterer Öleinleitung (Vorderansicht).....	74
Bild 78: Leitbleches zur Teilung des Volumenstroms.....	75
Bild 79: Anordnung des Leitbleches zur Aufteilung des Volumenstroms.....	75
Bild 80: Veränderte Position de Drallkörpers beim Volumenstromaufteilungsversuch	76
Bild 81: Gasdüse zur Öldampfeinleitung.....	76
Bild 82: Anordnung der Gasdüse im Brennerrohr	76
Bild 83: Verwendetes Stahlgewebe	77
Bild 84: Anordnung von Stahlgewebe und Drallkörper im Brennerrohr	78
Bild 85: Darstellung der Verbrennung mit Stahlgewebeeinbau	78
Bild 86: Stickoxidemission in Abhängigkeit vom Heizölanteil im zugeführten Brennstoff.....	80
Bild 87: Kohlenmonoxidemission in Abhängigkeit vom Heizölanteil im zugeführten Brennstoff	81

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionswerte handelsüblicher Ölbrennertypen (nach /F43/)	14
Tabelle 2: Primärmaßnahmen zur Stickoxidminderung und deren Wirkungsweise	16
Tabelle 3: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse bei unterschiedlichen Brennerkonfigurationen	38
Bild 24: Schaltplan Motor /F51/ Tabelle 4: Angeschlossene Pins des Motors	41
Tabelle 5: Messwerte des Spiralenabstandes	64