

Diplomarbeit

**Experimentelle Untersuchungen an einem
Gasflammenversuchsreaktor zur Charakterisierung der
Gasphasenverbrennungsprozesse
in Biomasserostfeuerungen**

Verfasser:

Herwig Kamnig

Betreuer:

Prof. Univ-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger

Dipl.-Ing. Dr. Robert Scharler (mitwirkender Assistent)

TU Graz, Institut für Prozess- und Partikeltechnik

Graz, November 2012

Diese Arbeit ist meinen Eltern Jakob und Silvana gewidmet,
die mich immer unterstützt und mir mein Studium der Verfahrenstechnik ermöglicht haben.

Danksagung

Auf dem Weg zur Erstellung meiner Diplomarbeit haben mich viele Menschen mit ihrem Fachwissen beraten beziehungsweise sind mir moralisch zu Seite gestanden. Hiermit möchte ich mich bei meinen Eltern, meiner Freundin, meinen Betreuern, Professoren, Kollegen und Freunden herzlich bedanken.

- Dipl.-Ing. Dr. Ursula Meyer - Korrekturlesen und moralische Unterstützung
- Prof. Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Ingwald Obernberger - Bereitstellung der Infrastruktur und Equipment zur Erstellung dieser Diplomarbeit
- Dipl.-Ing. Dr. Robert Scharler - Betreuung der Diplomarbeit und Korrektur
- Dipl.-Ing. Dr. Thomas Brunner - Projektkoordinator beim Flammenreaktorbau
- Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Jakob Woisetschläger - LDA-Messaufbau und Unterstützung bei der Messwertinterpretation sowie moralische Unterstützung
- Mag. Nikola Evic – Unterstützung bei der Labortechnik und stetiger Motivator
- Dipl.-Ing. Dr. Kai Schulze - Unterstützung bei Interpretation von Messergebnissen sowie moralische Unterstützung
- M. Sc. Ali Shiehnejad-Hesar - Prüfung der Messergebnisse mit CFD-Simulationen
- Johann Grubbauer – Hilfestellung bei meinen Arbeiten in der Werkstatt sowie Ausführung von Umbauarbeiten am Reaktor
- Dipl.-Ing. Dr. Fritz Biedermann - Unterstützung bei der Messtechnik
- Dipl. Ing. Thomas Schuster - Bau des elektrischen Zündsystems für den Reaktor
- Dipl. Ing. (FH) Markus Brenner - Installierung der Elektrik für den Versuchsaufbau
- Dipl. Ing. Dr. Selma Zahirovic - CFD-Simulationen während der Konstruktionsphase des Flammenreaktors

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 11.11.2012

Herwig Lorenz

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	18
ABSTRACT	20
1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	22
2 GRUNDLAGEN DER FLAMMENCHARAKTERISIERUNG	25
2.1 LAMINARE NICHT VORGEMISCHTE FLAMME	27
2.2 LAMINARE VORMISCHFLAMME	29
2.3 LAMINARE PARTIELLE VORMISCHFLAMME	30
2.4 TURBULENZBESCHREIBUNG DER FLAMME	31
3 BIOMASSE-ROSTFEUERUNGEN	33
3.1 VERFAHRENSTECHNISCHE EINTEILUNG VON FESTSTOFFVERBRENNUNGSSYSTEMEN	33
3.2 EINFLUSSFAKTOREN AUF FLAMMENCHARAKTERISIERUNG IN BIOMASSE ROSTFEUERUNGEN	35
3.3 CHARAKTERISTISCHE KENNGRÖßEN IN ROSTFEUERUNGEN	39
4 MESSVERFAHREN	40
4.1 MOTIVATION FÜR MESSUNGEN IN KALTEN STRÖMUNGEN	40
4.2 MOTIVATION FÜR MESSUNGEN IN FLAMMEN	41
4.3 ÜBERBLICK ÜBER DIE VERWENDETEN MESSGERÄTE	41
4.4 FOURIER-TRANSFORMATIONS-INFRAROT-SPEKTROSKOPIE-VERFAHREN ZUR CO ₂ -, CO-, H ₂ O- UND CH ₄ -GASKONZENTRATIONSMESSUNG	43
4.5 INFRAROT-ABSORPTIONS VERFAHREN ZUR CO- UND CO ₂ -GASKONZENTRATIONS- MESSUNG	45
4.6 PARAMAGNETISCHES VERFAHREN ZUR O ₂ -GASKONZENTRATIONSMESSUNG	47
4.7 LASER-DOPPLER-ANEMOMETRIE-VERFAHREN ZUR GASGESCHWINDIGKEITSMESSUNG	48
5 VERSUCHSAUFBAU – ENTWICKLUNGSSTUFE 1	50
5.1 AUSLEGUNGSKRITERIEN FÜR DEN VERSUCHSAUFBAU DER ENTWICKLUNGSSTUFE 1	50
5.2 FLIEßBILDER DES VERSUCHSAUFBAUES DER ENTWICKLUNGSSTUFE 1	51
5.3 GASMISCHER- UND GASTEILERSTATION	58
5.3.1 Gasentnahmestation	58

5.3.2	Mischeinheit und Splittereinheit für Verbrennungsgas	59
5.3.3	Verteilereinheit für Luft	60
5.3.4	Verteilereinheit für Zündgas	61
5.3.5	Displays für Reaktorüberwachung	62
5.4	FLAMMENREAKTOR	63
5.4.1	Reaktormantel	64
5.4.2	Reaktordämmung	65
5.4.3	Reaktorfenster	66
5.4.4	Gas- und Luftverteiler	71
5.4.5	Reaktormessöffnungen.....	74
5.4.6	Zündung der Flamme	76
5.5	ABGAS-ABSAUGUNGSSYSTEM	78
5.6	SICHERHEITSSYSTEME	80
5.6.1	Allgemeine Sicherheitsregeln.....	81
5.6.2	Sicherheitsgasschrank	81
5.6.3	Unterdruck.....	81
5.6.4	Temperatur	81
5.6.5	Not-Aus Schalter	82
5.6.6	Kohlenmonoxid-Sensoren.....	82
6	VERSUCHSAUFBAU – UMBAUARBEITEN UND OPTIMIERUNGEN.....	83
6.1	UNREGELMÄßIGE STRÖMUNGSVERTEILUNG IM GAS-LUFT VERTEILER	83
6.2	ÄNDERUNGEN DER DURCHFLUSSMENGEN DER VERSUCHSGASE.....	86
6.3	FALSCHLUFT IM REAKTOR.....	87
6.4	STRÖMUNGSVERLAUF DER FALSCHLUFT IM REAKTOR	89
6.5	HÖHENVERSTELLUNG DES SICHTFENSTERS	91
6.6	SPANNUNGEN IM REAKTORFENSTER.....	92
6.7	FLAMMENSTABILITÄT UND VERBRENNUNGSGAS.....	93
7	VERSUCHSAUFBAU - ENTWICKLUNGSSTUFE 2	95
7.1	FLIEBBILD FÜR MESSUNGEN IN KALTER STRÖMUNG	95
7.2	FLIEBBILD FÜR MESSUNGEN IN FLAMMEN	95
7.3	VERSUCHSMATRIX.....	96
7.4	MESSPOSITIONEN.....	99
7.5	MESSGENAUIGKEIT.....	101

7.5.1	Messgenauigkeit bei Konzentrationsmessung mit RGA	101
7.5.2	Messgenauigkeit bei Konzentrationsmessung mit FTIR.....	102
7.5.3	Messgenauigkeit der Mass-Flow-Controller	103
7.5.4	Messgenauigkeit der Rotameter	104
7.5.5	Gesamte Messgenauigkeit für die Versuche in kalter Strömung	105
7.5.6	Gesamte Messgenauigkeit für die Flammenversuche	106
8	ERGEBNISSE UND DISKUSSION FÜR MESSUNGEN IN KALTEN STRÖMUNGEN OHNE CHEMISCHE REAKTIONEN ..	109
8.1	VERSUCHSPARAMETER FÜR DIE KONZENTRATIONSMESSUNGEN IN KALTEN STRÖMUNGEN	109
8.2	ERGEBNISSE DER KONZENTRATIONSMESSUNGEN IN KALTEN STRÖMUNGEN	111
8.3	DISKUSSION DER MESSERERGEBNISSE IN KALTEN STRÖMUNGEN	118
9	ERGEBNISSE UND DISKUSSION FLAMMENMESSUNGEN	123
9.1	VERSUCHSPARAMETER FÜR DIE FLAMMEN-KONZENTRATIONSMESSUNGEN	123
9.2	ERGEBNISSE DER KONZENTRATIONSMESSUNGEN IN DEN FLAMMEN.....	125
9.3	DISKUSSION DER FLAMMENMESSUNGEN	139
10	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	147
11	QUELLENVERZEICHNISS.....	151

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Berechnungsprofils für eine Schüttung ohne Strahlenbildung	24
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Berechnungsprofils für eine Schüttung mit Strahlenbildung.....	24
Abbildung 3: Überblick über laminare Flammentypen.....	27
Abbildung 4: Laminare nicht vorgemischte Flamme (Diffusionsflamme).....	28
Abbildung 5: Laminare Vormischflamme.....	29
Abbildung 6: Laminare partielle Vormischflamme.....	31
Abbildung 7: Einteilung von Feststoffverbrennungssystemen.....	34
Abbildung 8: Formfaktorverläufe.....	37
Abbildung 9: Gaskonzentration Analyse-Gerät mit Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie-Verfahren (FTIR) und Pumpe.....	42
Abbildung 10: Gaskonzentration Analyse-Gerät mit Infrarot-Absorptions- und paramagnetischem Verfahren (RGA)	42
Abbildung 11: Gasgeschwindigkeit Analyse-Gerät mit Laser Doppler Anemometrie Verfahren (LDA)	42
Abbildung 12: Schematischer Aufbau eines Interferometers.....	43
Abbildung 13: FTIR-Interferogramm vor Fourier Transformation.....	44
Abbildung 14: FTIR-Interferogramm nach Fourier Transformation	45
Abbildung 15: Infrarot-Absorptionsmessprinzip (und ultraviolett Absorptionsmessprinzip)	46
Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau der paramagnetischen Messkammer zur O ₂ -Konzentrationsmessung	48
Abbildung 17: Schematischer Aufbau des Laser-Doppler-Anemometrie Verfahrens.....	49
Abbildung 18: Versuchsaufbau - Panoramagesamtansicht	51
Abbildung 19: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1.....	53

Abbildung 20: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1 – Drucktest	54
Abbildung 21: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1 – Zündung	55
Abbildung 22: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1 – Betrieb	56
Abbildung 23: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1 - Spülen	57
Abbildung 24: Gasmischer- und Gasteilerstation – Gesamtansicht	58
Abbildung 25: Gasentnahmestation	59
Abbildung 26: Mischeinheit und Splittereinheit für Verbrennungsgas.....	60
Abbildung 27: Luftverteilungseinheit für Spülluft und Verbrennungsluft.....	61
Abbildung 28: Verteilereinheit für Zündgas	62
Abbildung 29: Display für Reaktorüberwachung.....	62
Abbildung 30: Flammenreaktor Fotoansicht.....	63
Abbildung 31: Flammenreaktor Explosionszeichnung	64
Abbildung 32: Keramikfaserdämmung vor erstem Feuertest	66
Abbildung 33: Keramikfaserdämmung nach erstem Feuertest	66
Abbildung 34: Reaktorfenster Verschiebepositionen.....	67
Abbildung 35: Fensterschiebeelement Klemmung.....	68
Abbildung 36: O ₂ Konzentration [mol/mol] für verschiedene Spülluftkonzepte.....	69
Abbildung 37: Detailansicht der Fensterspülung	70
Abbildung 38: O ₂ Konzentration [mol/mol] bei Fensterspülung in unterster Messhöhe	70
Abbildung 39: O ₂ Konzentration [mol/mol] bei Fensterspülung in mittlerer Messhöhe	71
Abbildung 40: Gas- Luftverteiler Fotoansicht	71
Abbildung 41: Gas- Luftverteiler 3D Ansicht.....	72
Abbildung 42: Gas- Luftverteiler Kammernansicht.....	72
Abbildung 43: Gas- und Luftverteilungsvarianten ohne Blendenvariation.....	73
Abbildung 44: Überwachungsstutzen und Probenahmestutzen	75
Abbildung 45: Probenahmelanzen.....	76

Abbildung 46: Gesamtansicht der elektrischen Zündeinheit.....	77
Abbildung 47: Detailansicht der elektrischen Zündeinheit	77
Abbildung 48: Gesamtansicht der händischen Zündeinheit	78
Abbildung 49: Absaughaube	79
Abbildung 50: Not-Aus Schalter für Versuchsaufbau.....	82
Abbildung 51: Mobiler CO Sensor.....	82
Abbildung 52: Gassplittereinheit vor Gas-Luft Verteiler.....	84
Abbildung 53: Regelmäßige Strömungsverteilung im Gas-Luft Verteiler für Flamme.....	86
Abbildung 54: CO ₂ -Gaskonzentration mit und ohne Fremdluftzufuhr im Kamin des Reaktors	88
Abbildung 55: Absaughaube für Entwicklungsstufe 2 Versuchsaufbau	89
Abbildung 56: Keramikfaserdämmung vor Optimierungsanpassungen	90
Abbildung 57: Reaktorquerschnitt mit Strömungssituation vor Optimierungsanpassungen	90
Abbildung 58: Keramikfaserdämmung nach Optimierungsanpassungen	91
Abbildung 59: Keramikfaserpapierdichtung am Reaktorboden.....	91
Abbildung 60: Strömungsmöglichkeit bei Höhenverstellung des Fensters.....	92
Abbildung 61: Fenster mit Hochtemperatur-Silikondichtung.....	93
Abbildung 62: Fließbild für kalte Messungen.....	95
Abbildung 63: Fließbild für die Flammenmessungen.....	96
Abbildung 64: Versuchsgas- und Luftverteilung für kalte Versuche und Flammenversuche	97
Abbildung 65: Messpositionsrichtung.....	100
Abbildung 66: Messpositionen über den Achsabstand.....	100
Abbildung 67: Messpositionen über die Messhöhe.....	101
Abbildung 68: Schiefstellung in der Flamme ohne Flammenabhebung mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s.....	142

Abbildung 69: Schiefstellung in der Flamme und teilweise Flammenabhebung mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s	142
Abbildung 70: Schiefstellung in der Flamme und Flammenabhebung mit $v_{\text{Gas}}=4$ m/s.....	142
Abbildung 71: Einfluss der Probenahmelanze auf die Flammenstabilität bei $v_{\text{Gas}}=2$ m/s	143

Diagramme

Diagramm 1: Bruttoinlandsverbrauch Bioenergie 2007 in Petajoule.....	22
Diagramm 2: Beispiel für eine unregelmäßige Gasgeschwindigkeitsverteilung in der Messkammer über den Verteilerrohren in kalter Strömung	84
Diagramm 3: Beispiel für eine regelmäßige Gasgeschwindigkeitsverteilung in der Messkammer über den Verteilerrohren in kalter Strömung	85
Diagramm 4: arithmetische Mittelwertbildung aus RGA-Messergebnissen.....	102
Diagramm 5: arithmetische Mittelwertbildung aus FTIR Messergebnissen.....	103
Diagramm 6: CO ₂ -Konzentration über den Achsabstand in kalter Strömung mit $v_{\text{Gas}}=2\text{m/s}$	115
Diagramm 7: CO ₂ -Konzentration über den Achsabstand in kalter Strömung mit $v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$	115
Diagramm 8: CO ₂ -Konzentration über den Achsabstand in kalter Strömung mit $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$	116
Diagramm 9: O ₂ -Konzentration über den Achsabstand in kalter Strömung mit $v_{\text{Gas}}=2\text{m/s}$...	117
Diagramm 10: O ₂ -Konzentration über den Achsabstand in kalten Strömung mit $v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$	117
Diagramm 11: O ₂ -Konzentration über den Achsabstand in kalten Strömung mit $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$	118
Diagramm 12: Korrelation zwischen CO ₂ - und O ₂ -Konzentrationen aller Messwerte in kalter Strömung.....	119
Diagramm 13: CO ₂ -Konzentrationen mit Messfehlertoleranz in Messhöhe=205mm in kalten Strömungen für alle Geschwindigkeitsvarianten	120
Diagramm 14: O ₂ -Konzentrationen mit Messfehlertoleranz in Messhöhe=205mm in kalten Strömungen für alle Geschwindigkeitsvarianten	121
Diagramm 15: CH ₄ -Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=2\text{m/s}$	129
Diagramm 16: CH ₄ -Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$	130
Diagramm 17: CH ₄ -Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$	130

Diagramm 18: O ₂ -Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=2\text{m/s}$	131
Diagramm 19: O ₂ -Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$	132
Diagramm 20: O ₂ -Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$	132
Diagramm 21: CO-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=2\text{m/s}$	133
Diagramm 22: CO-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$	134
Diagramm 23: CO-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$	134
Diagramm 24: CO ₂ -Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=2\text{m/s}$	135
Diagramm 25: CO ₂ -Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$	136
Diagramm 26: CO ₂ -Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$	136
Diagramm 27: H ₂ O-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=2\text{m/s}$	137
Diagramm 28: H ₂ O-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$	138
Diagramm 29: H ₂ O-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$	138
Diagramm 30: CH ₄ -Konzentrationen über den Achsabstand in der Flamme auf der Messhöhe 205 mm für alle Geschwindigkeitsvarianten	139
Diagramm 31: CO-Konzentration über den Achsabstand in einer Vorversuchsflamme	141
Diagramm 32: H ₂ O-Konzentration über den Achsabstand in einer Vorversuchsflamme.....	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nomenklatur für Reynoldszahlen.....	32
Tabelle 2: Äquivalente Kugeldurchmesser	36
Tabelle 3: Charakteristische Größen für Rostfeuerungen	39
Tabelle 4: kinematische Viskosität des Versuchsgases und der Luft.....	74
Tabelle 5: maximale Unterdruckgrenzen im Reaktor.....	80
Tabelle 6: MFC für Entwicklungsstufe 2 Versuchsaufbau	87
Tabelle 7: Flammenfotos einer CH ₄ /Luft Flamme bei Variation der Brenngasgeschwindigkeit und des Vormischungslambdas	94
Tabelle 8: Referenzwerte einer Flammen-Versuchsmatrix zur Erstellung der kalten Versuchsmatrix	98
Tabelle 9: Versuchsmatrix für Versuche in kalter Strömung.....	98
Tabelle 10: Versuchsmatrix für Flammenversuche.....	99
Tabelle 11: Messposition gekoppelt mit Messtiefe in mm.....	101
Tabelle 12: Messgenauigkeit bei Volumenflussregelung mit MFC [27]	104
Tabelle 13: Messabweichungen der MFC im Detail bei kalten Versuchen	105
Tabelle 14: Gesamte Messabweichung für CO ₂ -Konzentration bei kalten Versuchen.....	106
Tabelle 15: Gesamte Messabweichung für O ₂ -Konzentration bei kalten Versuchen	106
Tabelle 16: Messabweichungen der MFC im Detail bei Flammenversuchen Teil 1	106
Tabelle 17: Messabweichungen der MFC im Detail bei Flammenversuchen Teil 2	107
Tabelle 18: Gesamte Messabweichung für CH ₄ -Konzentration bei Flammenversuchen	107
Tabelle 19: Gesamte Messabweichung für O ₂ -Konzentration bei Flammenversuchen	108
Tabelle 20: Gesamte Messabweichung für CO ₂ -Konzentration bei Flammenversuchen	108
Tabelle 21: Gesamte Messabweichung für H ₂ O-Konzentration bei Flammenversuchen	108
Tabelle 22: Versuchsparameter für kalte Strömung mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s	110
Tabelle 23: Versuchsparameter für kalte Strömung mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s	110

Tabelle 24: Versuchsparameter für kalte Strömung mit $v_{\text{Gas}}=4$ m/s	111
Tabelle 25: Messwerte der CO_2 - und O_2 -Konzentrationen der Versuchsreihe in kalter Strömung mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s	112
Tabelle 26: Messwerte der CO_2 - und O_2 -Konzentrationen der Versuchsreihe in kalter Strömung mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s	113
Tabelle 27: Messwerte der CO_2 - und O_2 -Konzentrationen der Versuchsreihe in kalter Strömung mit $v_{\text{Gas}}=4$ m/s	113
Tabelle 28: CO_2 - und O_2 -Mischkonzentrationen für vollständige Vermischung in Messhöhe 205 mm aus Messwerten berechnet für kalte Strömungen.....	122
Tabelle 29: Reynoldszahlen für die Versuchsreihen in kalten Strömungen.....	123
Tabelle 30: Versuchsparameter für Flammenmessungen mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s	124
Tabelle 31: Versuchsparameter für Flammenmessungen mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s	124
Tabelle 32: Versuchsparameter für Flammenmessungen mit $v_{\text{Gas}}=4$ m/s	125
Tabelle 33: Messwerte der CO , CO_2 , H_2O , CH_4 und O_2 Konzentrationen der Flammen-Versuchsreihen mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s.....	126
Tabelle 34: Messwerte der CO , CO_2 , H_2O , CH_4 und O_2 Konzentrationen der Flammen-Versuchsreihen mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s.....	127
Tabelle 35: Messwerte der CO , CO_2 , H_2O , CH_4 und O_2 Konzentrationen der Flammen-Versuchsreihen mit $v_{\text{Gas}}=4$ m/s.....	128
Tabelle 36: Berechnung der Volumenströme für die vollständige Verbrennung bei den Flammenversuchen	140
Tabelle 37: O_2 -, CO_2 - und H_2O -Konzentrationsberechnung aus eingeregelteten CH_4 - und Luft-Volumenströmen für vollständige Verbrennung	140
Tabelle 38: O_2 -, CO_2 - und H_2O -Spezieskonzentrationsberechnung aus Messwerten für die vollständige Verbrennung von CH_4 mit Luft.....	145
Tabelle 39: Reynoldszahlen für die Flammenversuche.....	146

Formelverzeichnis

Formel 1: Allgemeine Definition der Reynoldszahl.....	31
Formel 2: Formfaktor (=Sphärizität).....	36
Formel 3: Schüttdichte	38
Formel 4: Porosität des Brennstoffbetts	38
Formel 5: Mittlere effektive Strömungsgeschwindigkeit im Brennstoffbett.....	38
Formel 6: hydraulische Einlaufänge.....	73
Formel 7: Geschwindigkeitsberechnung aus Volumenstrom.....	99
Formel 8: Ideale Gasgleichung.....	99
Formel 9: Berechnung der maximalen MFC Volumenstromabweichung.....	104
Formel 10: Berechnung der prozentualen MFC Gesamtabweichung	104
Formel 11: Mischkonzentration.....	112
Formel 12: Geradengleichung für die Mischkorrelation zwischen CO ₂ - und O ₂ Konzentrationen für die kalten Messungen	119
Formel 13: Konzentrationsmittelwertbildung für vollständige Vermischung in kalter Strömung ohne Geschwindigkeitsgradienten	122
Formel 14: Konzentrationsmittelwertbildung für vollständige Vermischung in der Flamme mit Geschwindigkeitsgradienten	143
Formel 15: Reaktionsgleichung für die Verbrennung von CH ₄ mit O ₂ zu CO ₂ und H ₂ O.....	144
Formel 16: Reaktionsgleichung für die Verbrennung von CO mit O ₂ zu CO ₂	144

Abkürzungen

PJ	Petajoule (1 PJ = 10 ¹⁵ Joule)
CFD	Computational Fluid Dynamics
FTIR	Fourier Transformed Infrarot
LDA	Laser Doppler Anemometrie
LIF.....	Laserinduzierte Fluoreszenz
PAS	Photoakustische Spektroskopie
ppmv	parts per million volume
RGA	Rauchgasanalytik
s _L	Flammengeschwindigkeit in [m/s] oder [cm/s]
δ _L	theoretische Flammenfrontdicke in [mm] oder [μm]
δ _R	Reaktionszonendicke in [mm] oder [μm]

Kurzfassung

Ziel der Diplomarbeit war die Bereitstellung von Messdaten für die Entwicklung eines Gasphasenverbrennungsmodells, welches den niedrig-turbulenten Strömungsbereich und den Einfluss der Strahlenbildung auf den Mischungsfortschritt von partiell vorgemischten Flammen über dem Brennstoffbett von Biomasse-Rostfeuerungen abbildet.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Konstruktion und dem Bau eines Flammenreaktors und einer Gasverteilungsstation zur Erzeugung von kalten Strömungen ohne chemische Reaktion und partiell vorgemischten Flammen mit chemischer Reaktion, welche die niedrig-turbulenten Strömungen über dem Brennstoffbett in Biomasse Rostfeuerungen genähert abbilden sollen. Zur Untersuchung der laminaren bis schwach turbulenten Strömung sowie der auftretenden Gas- und Luftstrahlen und deren Einfluss auf den Mischungsfortschritt über dem Biomasse Brennstoffbett, wurde für den Versuchsaufbau ein Düsenkonzept zur Gas- und Luftverteilung verwendet. In kalten Strömungen sollen die Mischungseffekte niedrig turbulenter Strömungen sowie der Mischungsfortschritt aufgrund der Strahlenbildung, entkoppelt von chemischen Reaktionen, untersucht werden. In den Flammen gilt es zusätzliche Einflüsse, wie die Expansion des Gases und die chemischen Reaktionen, zu untersuchen. Weiters sollen mit den Messungen Gasphaseverbrennungsmodelle validiert werden. Über einen extraktiven Zugang im Reaktor können Gasproben für die Spezieskonzentrationsmessung mit RGA und FTIR entnommen werden. Ein optischer Zugang im Reaktor ermöglicht das Einsetzen von optischen Messverfahren wie die Gasgeschwindigkeitsmessung mit LDA oder die Flammentemperaturmessung mit Thermographie. Aufgrund von Erkenntnissen aus Vorversuchen wurden Optimierungen und Umbauarbeiten am Versuchsaufbau vorgenommen. Die wichtigsten Umbauarbeiten dienten zur Vermeidung von Falschlufströmen im Reaktor, zur gleichmäßigen Strömungsverteilung im Reaktor und zur Stabilisierung der Flamme. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden im Flammenreaktor FTIR- und RGA-Spezieskonzentrationsmessung in kalten Strömungen und in Flammen sowie LDA-Gasgeschwindigkeitsmessungen in kalten Strömungen durchgeführt. Für die finalen Messungen wurden nur Gaskonzentrationsmessungen mittels FTIR und RGA durchgeführt und diskutiert, da die LDA-Messeinheit nicht mehr zur Verfügung stand.

Die Messergebnisse in kalten Strömungen mit einem CO_2/N_2 -Gasgemisch und einem Luftstrom, liefern rotationssymmetrische CO_2 - und O_2 -Konzentrationsprofile. Die Messergebnisse zeigen, dass der Mischungsfortschritt entlang der Strömungsrichtung weitgehend entkoppelt

ist von den Gaseintrittsgeschwindigkeiten $v_{\text{Gas}}=2$ m/s bis $v_{\text{Gas}}=4$. Die Konzentrationsergebnisse der Messungen mit den $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{Luft}$ -Gemischen konnten mittels einer Stoffbilanz erfolgreich geprüft werden. Die Messergebnisse in kalten Strömungen entsprechen bezüglich der Gasgeschwindigkeiten zwischen 2 und 4 m/s sowie mit den Reynoldszahlen zwischen 800 und 9000 den laminaren bis niedrig-turbulenten Strömungsbedingungen von partiell vorge-mischten Flammen über dem Brennstoffbett in Biomasse Rostfeuerungen. Die Messergebnis-se der Flammenmessungen mit einem CH_4/Luft -Gasgemisch und einem Luftstrom, liefern mit RGA- und FTIR-Messungen nicht reproduzierbare Ergebnisse innerhalb der Flamme und weisen große Gasspeziesasymmetrien in der Flamme auf. Die Messergebnisse zeigen, dass die Gaseintrittsgeschwindigkeiten $v_{\text{Gas}}=2$ m/s bis $v_{\text{Gas}}=4$ mit dem Verbrennungsfortschritt von CH_4 in Strömungsrichtung gekoppelt sind. Die Konzentrationsergebnisse der Flammenmes-sungen mit einem CH_4/Luft -Gemisch konnten mit den vorhandenen Messwerten nicht erfolg-reich mittels einer Stoffbilanz geprüft werden. Für eine Stoffbilanzprüfung der Verbrennung sind Messungen im Kamin des Flammenreaktors, nach vollständiger Verbrennung und vor dem Fremdlufteintrag zur Kühlung des Rauchgases, notwendig.

Zusammengefasst liefern die Konzentrationsmessungen in kalter Strömung sehr gute Messer-gebnisse in Hinblick auf Strömungsstabilität, rotationssymmetrische Strömungsausbildung und Messgenauigkeit. Für Messungen in kalten Strömungen sind die Messverfahren mittels FTIR und RGA zur Konzentrationsmessung und das LDA-Messverfahren zur Gasgeschwin-digkeitsmessung zu empfehlen. Die RGA- und FTIR-Konzentrationsmessungen in den Flammen liefern keine zufriedenstellenden Messergebnisse aufgrund von Flammenasymmet-rien sowie dem Einfluss der extraktiven Probenahme mittels einer Probenahmelanze. Für Flammenmessungen im Reaktor sind berührungsfreie, optische Messverfahren mit einer hohen Messauflösung zu empfehlen. Geschwindigkeitsmessungen können mittels LDA-Verfahren über den bestehenden optischen Zugang durchgeführt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für die Anwendung dieses Messverfahren Feststoff-Seeding-Partikel in die Flamme eingebracht werden müssen. Dafür bedarf es einer Partikelauflage- sowie eine Partikelabscheideeinheit. Für die berührungsfreie Konzentrationsmessung in Flammen sind Messverfahren bezüglich des optischen Zugangs im Flammenreaktor zu evaluieren. Durch-lichtverfahren benötigen zwei optische Zugänge zum Messraum. Für die Anwendung von Durchlichtverfahren müsste der Flammenreaktor von einem auf zwei optische Zugänge umgebaut werden.

Abstract

The target of this diploma thesis was the provision of data for the development of a gas phase combustion furnace model for CFD-simulations, which describes the low turbulence gas flow and the influences of stratification on the progression of a mixing of gas flows in partially pre-mixed flames over the fuel bed of biomass grate furnaces.

In the thesis the planning and construction of a flame reactor and a gas distribution system is described. The reactor is constructed to conduct experiments with a cold gas flow without chemical reaction, as well as with a flame including chemical reactions. The warm flow will be used to attempt to simulate the low turbulence gas flow over the fuel bed of biomass grate furnaces. The nozzle concept of the reactor for gas and air distribution enables the investigation of the laminar to low turbulence flows as well as the stratification of gas and air. The influence of stratification, on the progression of mixing of gas flows can also be studied. In the cold gas flow the mixing effects in low turbulence and the influence of the stratification on the progression of the mixing of the gas flows have been investigated. In the flame the additional influences of the progression of the mixing of flows, the expansion of the gases and the chemical reaction were examined. The results of the flame experiments should be used to validate the models of the gas phase combustion furnace. Via an extractive access to the reactor chamber gas samples can be taken and analyzed by means of RGA and FTIR. Optical access to the reactor chamber enables non-intrusive optical measurements, such as gas velocity measurements with LDA or thermography to determine the flame temperature. Due to results of preliminary experiments the reactor had to be optimized to avoid an accidental intake of air and to stabilize the flame. The final measurements were executed for measurements of the species concentrations with FTIR and RGA. Velocity measurements with LDA could not be performed, because the LDA measurement unit was not any longer available.

The concentration measurements in the cold gas flow by means of FTIR were conducted with an air and CO₂/N₂ gas mixture. The investigated velocities were $v_{\text{Gas}}=2$ m/s, $v_{\text{Gas}}=3$ m/s and $v_{\text{Gas}}=4$ m/s. The results show a rotation symmetric concentration profile of both, CO₂ and O₂. The different gas inlet velocity does not have a significant influence on the progress of the mixture in direction of gas flow. The results of the concentration measurements in the cold gas flow could successfully be validated by means of a material balancing calculation. To perform this calculation the results were compared with the theoretically calculated values for the concentrations in a complete mixture of the injected CO₂/N₂/air system. The results of the

cold gas flow experiments with the Reynolds numbers in the range of 800 to 9000 meet the conditions in a gas flow in the range of laminar to low turbulence created by partial pre-mixed flames over the fuel bed of biomass grate furnaces.

The measurements in the flame were conducted with a CH₄/air mix as the gas system, mixed with a defined air flow. The investigated velocities were $v_{\text{Gas}}=2$ m/s, $v_{\text{Gas}}=3$ m/s and $v_{\text{Gas}}=4$ m/s. The measurements performed by means of RGA and FTIR did not provide reproducible results. They show asymmetries of the concentration of the gas species within the flame. The results show furthermore that the progression of the combustion of CH₄ is coupled with the velocity of the gas. The concentration of CH₄ species increases with increasing gas velocity. The results of the measurements of the concentration in the CH₄/air flame could not be validated by a balance of materials. To be able to achieve results which can be validated, data of complete combustion would need to be obtained.

Summing up, the concentration measurements in the cold gas flow provided satisfying results in regard to flow stability, the formation of a rotation symmetric flow and measurement accuracy. FTIR and RGA can be recommended as an analytic technique for the measurements of the concentrations in the cold gas flow. The LDA is suitable to perform measurement of gas velocities. In the flame RGA and FTIR do not provide satisfactory results due to the asymmetry of the flame and the negative influence of the invasive sampling. Optical, non-invasive, detection methods with high resolution would be recommended for such concentration measurements. It has to be considered that several suitable techniques, such as laser induced fluorescence spectroscopy (LIF) apply a transmission technique which would require secondary optical access to the reactor chamber. Measurements of the gas velocities could be performed by means of LDA. For this measurement technique it has to be taken in account that solid seeding particles need to be introduced into the flame. Therefore the reactor would need to be equipped with a particle seeding station and a particle separation unit.

1 Problemstellung und Zielsetzung

Am 23. April 2009 trat die Richtlinie 2009/28/EG des europäischen Parlaments und Rats zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG in Kraft. Verbindliches Kernziel dieser Richtlinie ist es den Anteil der erneuerbaren Energien am europäischen Energiemix bis 2020 auf 20 % zu heben. Dies ist ein Meilenstein in der europäischen Energiepolitik. Erstmals gibt es eine umfassende Richtlinie zu allen drei Bereichen unserer Energieversorgung: Wärme, Strom und Treibstoff.

Der österreichische Bruttoinlandsverbrauch an Energie betrug 2007 rund 1421 Petajoule (PJ), der Anteil an erneuerbaren Energieträgern in etwa 25,3 % oder 358,9 PJ. Für Österreich sieht die Richtlinie den Ausbau des erneuerbaren Energieanteils auf 34% vor. Um diese Vorgabe zu erreichen, bedarf es weniger fossiler Energienutzung, eines weit gehenden Stopps des Verbrauchsanstieges durch eine drastische Effizienzverbesserung und Sparbemühungen sowie eines wesentlich beschleunigten Ausbaus der erneuerbaren Energien [1].

Bei den erneuerbaren Energieträgern dominieren in Österreich Bioenergie mit einem Anteil von 59,3 % und Wasserkraft mit einem Anteil von 36 %. Mehr als die Hälfte der Bioenergie in Österreich wird aus der Nutzung von Brennholz und Holzabfällen erzeugt. Mit einem Anteil von etwa 30 % an der Bioenergie ist Scheitholz der wichtigste biogene Energieträger (siehe Diagramm 1).

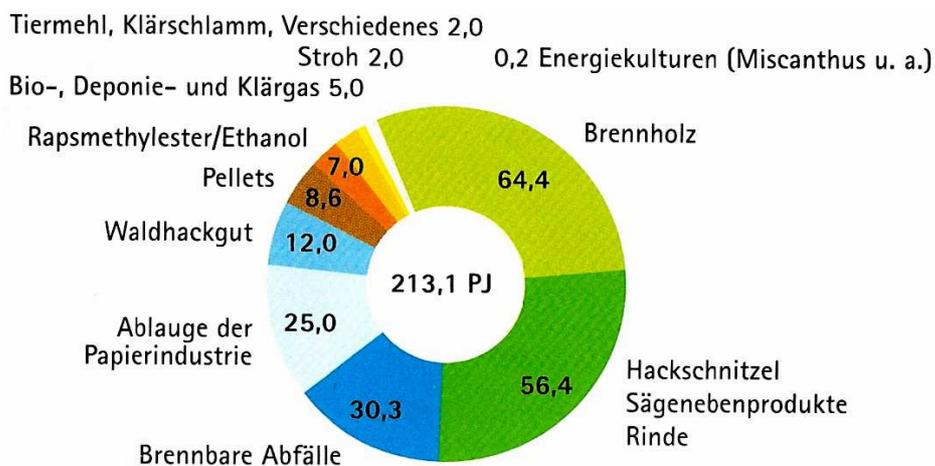


Diagramm 1: Bruttoinlandsverbrauch Bioenergie 2007 in Petajoule

Erläuterung: Quelle [1]

Die ländlichen Haushalte werden schon seit jeher durch Wärme aus Biomasse, insbesondere Holz versorgt. Aktuell heizen 92 % der ländlichen Haushalte mit Biomasse. In den städtischen Einzugsgebieten benutzen immer mehr Menschen Holz, Pellets und Hackgut zur Wärmeerzeugung wodurch der bundesweite Anstieg an Biomasseheizungen erklärt werden kann [2].

Moderne Biomasseheizungen sind Hightech-Produkte, in deren Realisierung viel Entwicklungsarbeit investiert werden muss. Insbesondere bei der Optimierung des Feuerraums und des Verbrennungsprozesses setzen moderne Unternehmen immer öfter auf CFD-Simulationen (englisch: computational fluid dynamics). Sie sind eine etablierte Methode der Strömungsmechanik und haben das Ziel, strömungsmechanische Probleme approximativ mit numerischen Methoden zu lösen.

Die gebräuchlichen Gasphasenverbrennungsmodelle sind für hochturbulente Bereiche, welche z.B. in Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren auftreten, entwickelt worden. In Biomassefeuerungen treten jedoch speziell über dem Rost und im kleinen Leistungsbereich niedrig bis moderat turbulente Strömungsbereiche auf. Ziel ist es deswegen, ein Gasphasenverbrennungsmodell zu entwickeln und soweit anzupassen, um diesen Verbrennungsprozess im niedrig turbulenten Bereich charakterisieren zu können.

Durch die Brennstoffstückigkeit und die Tunnelbildung im Brennstoffbett treten Luft- und Rauchgasstrahlen über dem Brennstoffbett auf. Somit muss der Verbrennungsprozess als nicht bzw. partiell vorgemischte Verbrennung angesehen werden. Bestehende Festbett-Abbrandmodelle beschreiben jedoch ein Rauchgasgemisch aus Verbrennungsgas und Luft über dem Brennstoffbett. Diese Modellvorstellung (siehe Abbildung 1) führt zu einem schnelleren Reaktionsfortschritt in der Gasflamme und zu einem zu schnellen Abbrand in der Simulation.

Deshalb werden CFD-Modelle benötigt, welche den Einfluss der Strahlenbildung auf den Verbrennungsprozess berücksichtigen (siehe Abbildung 2). Um diese CFD-Modelle entwickeln und validieren zu können, werden Messdaten einer niedrigturbulenten Strömung benötigt. Ziel dieser Diplomarbeit war es, einen Flammenreaktor zu konzipieren und zu bauen, um in diesem die benötigten Daten zu messen. Weiters wurden in diesem Reaktor erste Messungen durchgeführt und bewertet.



Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Berechnungsprofils für eine Schüttung ohne Strähnenbildung

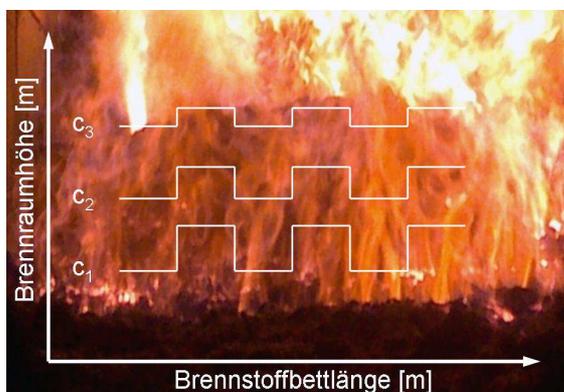


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Berechnungsprofils für eine Schüttung mit Strähnenbildung

Eine wesentliche Zielsetzung bei der Konzeption war, im Reaktor ähnliche Strömungsregime bezüglich der Gas- und Luftgeschwindigkeit zu erzeugen und die Strähnenbildung wie in Biomasse-Rostfeuerungen unter vereinfachten Rahmenbedingungen nachzubilden. Die Strömungsgeschwindigkeiten sollen durch Variation von Volumenströmen verändert werden, um Reynoldsbereiche im laminaren bis niedrig turbulenten Bereichen erzeugen zu können. Um die Strähnenbildung von Luft- und Brenngassträhnen im Brennstoffbett simulieren zu können, wurde ein Düsenkonzept verwendet.. Dieses ermöglichte unterschiedliche Brennstoff-Luft-Gemische über definiert angeordnete Konfigurationen in den Reaktorraum einströmen zu lassen.

Der nächste Schritt bestand darin, einen Gasflammenreaktor, eine Gasmischstation und eine Gasverteilungseinheit so zu konstruieren und zu bauen, welche es ermöglicht, die Rahmenbedingungen zum Messen der gesuchten Einflussgrößen herzustellen.

Der dritte Teil der Diplomarbeit war die Inbetriebnahme des Reaktors und der Sekundärkomponenten sowie die Prüfung und Optimierung aller Komponenten.

Ziel der Messungen war es charakteristische Größen zu messen, die es ermöglichen den Strömungszustand im Reaktor mit dem Strömungszustand in Biomasse Rostfeuerungen vergleichen zu können. Es wurden Spezieskonzentrationsmessungen in einer kalten Strömung und in einer Flamme durchgeführt. Die Versuche in kalter Strömung wurden durchgeführt, um die Durchmischung in der laminaren bis niedrig turbulenten Strömung, sowie den Mischungsfortschritt aufgrund der Strahlenbildung zu charakterisieren. Die Versuche mit einer Flamme wurden vorgenommen, um die Vermischung von Gasströmen unter Berücksichtigung des thermischen und chemischen Einflusses (Expansion der Gase und Gasspeziesänderungen) zu betrachten. Aus den Messergebnissen können Rückschlüsse über den Mischungs-zustand von Brenngas mit Luft in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit sowie über den Einfluss der chemischen Reaktionen gezogen werden. Schlussendlich wurde eine Methodik zur Messung von Gaskonzentrationen und Gasgeschwindigkeiten in der kalten Strömung und in der Flamme gefunden. Die Konzentrationsmessungen wurden mit einem extraktiven Fourier-Transformed-Infrarot Gas-Analyse-Gerät (FTIR) und mit einem Rauchgas-Analyse-Gerät (RGA) durchgeführt. Für die Geschwindigkeitsmessungen wurde das Laser-Doppler-Anemometrie-Verfahren (LDA) eingesetzt.

Aufgrund der Ergebnisse der Testmessungen mit der FTIR, RGA und LDA wurden mehrere Reaktorkomponenten umgebaut. Für die finalen Messungen, welche in dieser Diplomarbeit dargestellt werden, wurden Spezieskonzentrationsmessungen mit der FTIR und RGA durchgeführt. Die Messergebnisse wurden auf Plausibilität, die Messgenauigkeit, den Mischungs-zustand und den Turbulenzzustand ausgewertet. Aufgrund des Zeitaufwandes für die Umbauarbeiten und Optimierungen am Versuchsaufbau wurden keine LDA-Messungen im Rahmen den finalen Messungen durchgeführt.

2 Grundlagen der Flammencharakterisierung

Als Gasflamme wird die Reaktionszone bezeichnet, wo zwei oder mehrere Gase zusammentreffen und chemisch exotherm unter Freisetzung von Strahlung miteinander reagieren. Die meisten Flammen emittieren Strahlung, im für das menschliche Auge sichtbaren Wellenlängenbereich, jedoch gibt es auch Flammen, welche für das menschliche Auge unsichtbar sind.

Grundsätzlich benötigt man einen Brennstoff, Sauerstoff und eine Zündquelle, um eine Flamme zu erzeugen.

Die Form der Flamme ist ein wichtiges Merkmal zur Charakterisierung und lässt Rückschlüsse auf die Art der Brennstoffzufuhr sowie die Strömungsgeschwindigkeit des Brennstoffs zu. Grundsätzlich werden Flammen aufgrund der Brennstoffzuführung in zwei Typen eingeteilt. Wenn der Brennstoff und der Sauerstoff bereits vorgemischt in die Reaktionszone eintreten, wird diese Flamme Vormischflamme genannt. Wenn der Brennstoff und der Sauerstoff der Reaktionszone getrennt zugeführt werden, nennt man diese Flamme Diffusionsflamme bzw. nicht vorgemischte Flamme [3]. Eine Mischform dieser beiden Flammentypen stellt die partiell vorgemischte Flamme, oder auch Teilvormischflamme genannt, da.

Weiteres werden Flammen aufgrund der Strömungsgeschwindigkeit in laminare und turbulente Flammen eingeteilt. Die Beschreibung von turbulenten Flammentypen ist sehr komplex und noch nicht vollständig erforscht. Mit Hilfe des Borghi-Diagramms können die turbulenten Flammentypen in Gruppen eingeteilt werden. Im Zuge dieser Diplomarbeit werden laminare Flammen bzw. niedrigturbulente Flammen betrachtet.

Mit Hilfe eines Bunsenbrenners, lassen sich eine nicht vorgemischte Flamme, eine Teilvormischflamme bis hin zur Vormischflamme, abhängig von der Luftzufuhr, herstellen. Das Prinzip des Bunsenbrenners besteht darin, dass der Brennstoff durch eine enge Düse von unten mit relativ hoher Geschwindigkeit in ein Rohr einströmt, welches seitlich Schlitze aufweist. Der hohe Impuls des Brennstoffstrahls erzeugt einen Unterdruck, wodurch über die Schlitze Luft angesaugt wird, welche sich mit dem Brennstoff vermischt. Somit liegt an der Austrittsöffnung des Bunsenbrenners ein weitgehend zündfähiges Brennstoff-Luft Gemisch vor. Abhängig über die Ventilstellung, welche die Luftzufuhr regelt, entsteht eine Diffusionsflamme, eine partielle Vormischflamme oder eine Vormischflamme.



Abbildung 3: Überblick über laminare Flammentypen

Erläuterung: Quelle [4]

Die Fotos in Abbildung 3 zeigen anschaulich den Überblick über alle laminaren Flammentypen, welche mit einem Bunsenbrenner erzeugt werden können. Foto 1 zeigt eine Diffusionsflamme. Bei dieser Flamme ist das Luftventil am Bunsenbrenner geschlossen. Die Fotos 2 und 3 zeigen Teilvormischflammen. Für das zweite Foto ist das Luftventil zur Hälfte geöffnet und für das dritte Foto fast vollständig geöffnet. Foto 4 zeigt eine reine Vormischflamme, welche durch vollständiges Öffnen des Luftventils erzeugt wird.

2.1 Laminare nicht vorgemischte Flamme

Brennstoff und Sauerstoff werden dem Brennraum getrennt zugeführt. Durch Konvektion und Diffusion kommt es zu einer Vermischung des Brennstoffs mit dem Sauerstoff. Erst dann kann eine chemische Reaktion stattfinden.

Laminare nicht vorgemischte Flammen werden in drei Zonen eingeteilt: der fette Bereich, die Flammenfront und der magere Bereich (siehe Abbildung 4).

Im fetten Bereich der Flamme ($\lambda < 1$) findet keine vollständige Verbrennung statt. In dieser Zone werden mikroskopisch kleine Rußpartikel gebildet. Auf der stöchiometrischen Oberfläche oder auch Flammenfront genannt ($\lambda = 1$) werden der Brennstoff und der Sauerstoff nahezu vollständig verbraucht. Die Reaktionsprodukte werden durch Konvektion und Diffusion ins Innere der Flamme sowie in die Umgebung transportiert. In der Nähe dieser Fläche treten auch die höchsten Temperaturen auf. Im mageren Bereich der Flamme ($\lambda > 1$) kommt es

üblicherweise zum Flammenleuchten. Rußpartikel aus der fetten Zone können in der mageren oxidierenden Umgebung vollständig verbrannt werden, sofern die Verweilzeit lange genug und die Temperatur hoch genug ist. Üblicherweise tritt dieser Fall nicht ein und die unverbrannten Rußpartikel emittieren Strahlung und es kommt zum typisch gelben Leuchten [3].

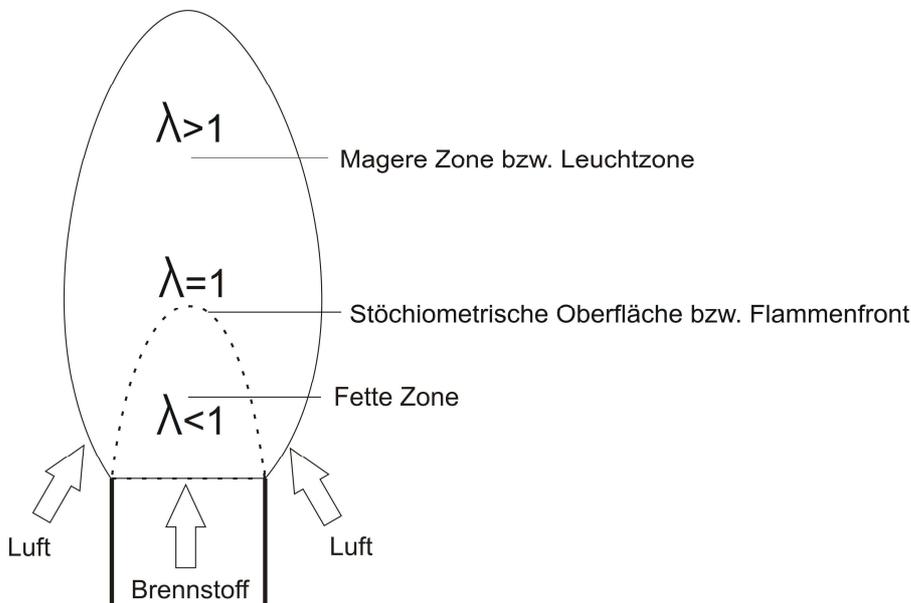


Abbildung 4: Laminare nicht vorgemischte Flamme (Diffusionsflamme)

Bei der Verbrennung wirken drei treibende Kräfte. Die Diffusion, die Konvektion und die chemische Reaktion. Im Falle der Diffusionsflamme liegt eine sehr rasche chemische Reaktion vor. Konvektion und Diffusion sind ungefähr im gleichen Größenverhältnis und benötigen sehr viel mehr Zeit als die chemische Reaktion. Die Diffusion ist der geschwindigkeitslimitierende Faktor. Die Modellvereinfachung bei Nicht-Berücksichtigung der chemischen Kinetik für Diffusionsflammen erklärt wichtige globale Eigenschaften wie zum Beispiel die Flammenlänge. Andere wichtige Phänomene wie Abheben und Verlöschen von Diffusionsflammen sowie die Bildung von Schadstoffen können nur erklärt werden, wenn die chemische Kinetik mitberücksichtigt wird [5].

Einfachstes Beispiel für eine solche Flamme ist die Kerzenflamme. Paraffin verdampft am Docht und diffundiert in die umgebende Luft. Gleichzeitig strömt Luft durch freie Konvektion aus der Umgebung zum Docht und vermischt sich mit dem Paraffindampf. Dort wo sich zwischen Paraffindampf und Luft ein stöchiometrisches Verhältnis bildet, findet in erster Linie die chemische Reaktion statt und somit die Verbrennung. Ein weiteres Beispiel für eine häufige technische Anwendung ist der Dieselmotor.

2.2 Laminare Vormischflamme

Der Brennstoff und der Sauerstoff werden bereits vorgemischt dem Brennraum zugeführt. Die Vormischflamme kann in drei Zonen eingeteilt werden: die Vorheizzone, Reaktionszone und Nachoxidationszone (siehe Abbildung 5). In der Vorheizzone finden Wärmeleitungs- und Diffusionsprozesse statt. Die eigentliche Reaktionszone, in welcher der Großteil der schnellen Radikalkettenreaktionen stattfindet, ist sehr dünn um die Flammenfront ausgebildet. In der Nachoxidationszone dominieren langsame Reaktionen wie zum Beispiel die Oxidation von CO zu CO₂. Vormischflammen sind blau bis blaugrün. Die blaue Farbe der Flammenfront beruht auf der Molekülstrahlung angeregter Radikale, insbesondere C₂^o und CH^o Radikale, welche bei der Verbrennung als Zwischenprodukte entstehen. Der Reaktionsfortschritt bei Vormischflammen ist im Allgemeinen schneller als bei Diffusionsflammen [6].

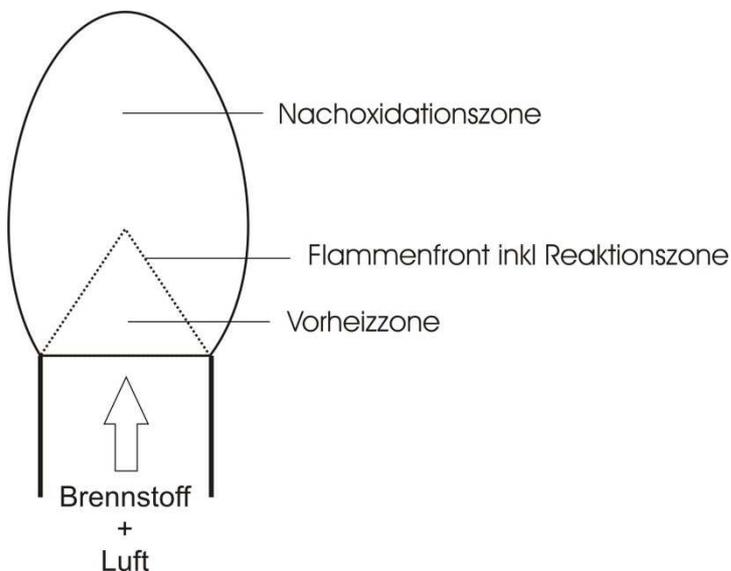


Abbildung 5: Laminare Vormischflamme

Zur Charakterisierung von laminaren Vormischflammen werden üblicherweise drei Kenngrößen verwendet: die laminare Flammengeschwindigkeit s_L , die theoretische Flammenfrontdicke δ_L und die Reaktionszonendicke δ_R . Die laminare Flammengeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit, mit welcher die Flammenfront der Brenngemischströmung entgegen brennt. Sie wird in [cm/s] oder [m/s] angegeben und resultiert aus komplexen Transport- und Reaktionsvorgängen in der Flamme. Typische laminare Flammengeschwindigkeiten liegen zwischen 0,1 m/s und 1,6 m/s abhängig vom Gasmisch, Temperatur und Druck. Die Flammenfronddicke beschreibt die Dicke der Flammenfront und wird in [μ m] oder [mm] angegeben. Sie bewegt sich in einer Größenordnung von 50 μ m bis 1 mm, abhängig vom Gasmisch, Temperatur und Druck. Die Reaktionszonendicke ist ein Teil der Flammen-

frontdicke und beschreibt die Zone, in welcher die schnellen Radikalkettenreaktionen stattfinden. Sie befindet sich auf der flammenzugewendeten Seite der Flammenfrontdicke, wird in [μm] oder [mm] angegeben und bewegt sich in einer Größenordnung von $100 \mu\text{m}$ [3,6].

Vormischflammen werden industriell dort eingesetzt, wo eine intensive Verbrennung auf kleinem Raum stattfinden soll. Aufgrund der Explosionsgefahr bei industriellen großen vorgemischten Flammen werden jedoch Diffusionsflammen eingesetzt. Ein Beispiel für eine laminare Vormischflamme ist der Bunsenbrenner bei entsprechender Luftregelung (siehe Abbildung 3).

2.3 Laminare partielle Vormischflamme

Eine Mischform zwischen der Diffusionsflamme und der Vormischflamme stellt die partiell vorgemischte Flamme dar. Diese Flamme kann ebenfalls mit einem herkömmlichen Bunsenbrenner erzeugt werden (siehe Abbildung 3). Der Brennstoffstrom ist beim Eintritt in den Flammenbereich bereits mit einem λ kleiner eins vorgemischt. Ein weiterer Luftstrom wird dem Flammenbereich getrennt zugeführt.

Diese Flammenart tritt im speziellen bei Biomasse-Rostfeuerungen auf. Betrachtet man zwei nebeneinander befindliche Brennstoffpartikel in einem Brennstoffbett, so wirken folgende Prozesse: Der Primärluftstrom umströmt die Partikel von unten nach oben und durchströmt den Spalt zwischen den Partikeln. Über die Oberfläche des Brennstoffguts strömt das Pyrolysegas aus den Partikeln. Bei der Umströmung des Brennstoffpartikels mit Luft bildet sich ein mit Luft partiell vorgemischter Brenngasstrom. Diese Flammenart ist Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen dieser Diplomarbeit.

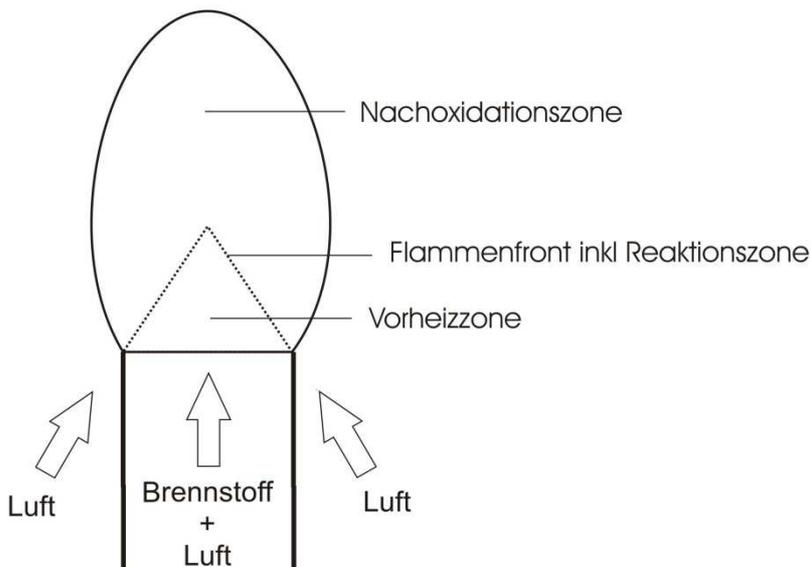


Abbildung 6: Laminare partielle Vormischflamme

2.4 Turbulenzbeschreibung der Flamme

Eine wichtige Größe zur Charakterisierung der Turbulenz in Strömungen ist die dimensionslose Reynoldszahl. Sie wird über die Geschwindigkeit, die kinematische Viskosität des Fluids sowie eine charakteristische Längenskala berechnet.

$$\text{Re} = \frac{\text{Geschwindigkeit} \cdot \text{Länge}}{\text{kinematische_Viskosität}} = \frac{w \cdot l}{\nu}$$

Formel 1: Allgemeine Definition der Reynoldszahl

Erläuterung: w ...Geschwindigkeit des Gases bzw. Fluids [m/s], l ...charakteristische Längenskala[m], ν ... kinematische Viskosität des Gases bzw. Fluids [m²/s]

Über die Größe der Reynoldszahl kann man auf den Turbulenzgrad in kalter Strömung oder in der Flamme rückschließen. Man kann für einen Strömungsraum verschiedene Reynoldszahlen definieren, welche sich in der Größenordnung unterscheiden.

Zur Beschreibung der Strömung im Reaktor werden in dieser Diplomarbeit zwei Reynoldszahlen definiert. Eine Reynoldszahlen soll die Turbulenz der Brenngases beim Austritt aus den Verteilerrohren beschreiben und eine weitere soll die Strahlenbildung und die auftretende Turbulenz zwischen einem Gasstrom und einem Luftstrom abbilden.

Die kinematische Viskosität und die Gas- bzw. Luftgeschwindigkeit sind abhängig vom Druck und der Temperatur. Da die Temperaturverteilung und Druckverteilung im Reaktor unbekannt ist, werden die kinematische Viskosität und die Gas- bzw. Luftgeschwindigkeit auf

den Normbedingungen bezogen. Bei Gasgemischen muss eine kinematische Viskosität für das Gemisch bestehend aus den einzelnen Gassepezies berechnet werden. Für die Reynoldszahl welche die Strähnen beschreibt, muss die kinematische Viskosität und die Geschwindigkeit über den Gas- und Luftstrom gemittelt werden. Zur Berechnung der kinematischen Viskosität für die Beschreibung einer Strähne wird die gemittelte Viskosität, aus einem Verteilerrohr für Luft und einem Verteilerrohr für Gas, verwendet. Die gemittelte Geschwindigkeit für die Strähne wird über eine Austrittsgeschwindigkeit für Gas und eine für Luft berechnet.

Die Wahl der charakteristischen Längenskala hängt von der Definition der Reynoldszahl ab. Im Versuchsaufbau für die Messungen in dieser Diplomarbeit werden Gasströme und Luftströme verwendet. Alle Ströme treten aus gleich großen kreisförmigen Öffnungen mit einem Durchmesser von 5 mm aus. Insgesamt bestehen 19 solcher Öffnungen. Zur Beschreibung der Turbulenz am Austritt eines Verteilerrohres wird die Reynoldszahl mit dem charakteristischen Längenmaß des Durchmessers von 5 mm gebildet. Für das charakteristische Längenmaß für eine Strähne wird der Abstand von 26,65 mm zwischen einer Gasdüse und einer Luftdüse verwendet.

Tabelle 1: Nomenklatur für Reynoldszahlen

$Re_{a,b} = \frac{w \cdot l}{\nu}$			
a		b	
kalte Versuche K	warme Versuche W	Gasgemisch G	Strähne S

Bei den Fällen der gebildeten Reynoldszahlen für das Gasgemisch tritt ein Axial-Freistahl auf. Der Turbulenzumschlag bei einem Axial-Freistrah, zwischen laminarer und turbulenter Strömung tritt bei Reynoldszahlen zwischen 100 und 1000 auf [3]. Für die Reynoldszahl zur Charakterisierung der Strähnenbildung kann kein Turbulenzumschlag zugeordnet werden. Auf Basis dieser Rechengrößen, welche ein Maß für den Turbulenzgrad sind, kann für die Turbulenzmodellierung ein geeignetes Turbulenzmodell gewählt werden.

3 Biomasse-Rostfeuerungen

3.1 Verfahrenstechnische Einteilung von Feststoffverbrennungssystemen

Grundsätzlich kann man die Feststoffverbrennungssysteme nach der Art der Brennstoffschicht einteilen. Die Brennstoffschicht wird in allen Fällen von einem Oxidator bzw. Luft durchströmt. Aufgrund der Anströmgeschwindigkeit stellen sich unterschiedliche System der Brennstoffschicht ein. Hier werden zwischen Rostfeuerungen, Wirbelschichtfeuerungen und Staubfeuerungen unterschieden [5].

Bei der Rostfeuerung liegt der stückige Brennstoff auf einer ruhenden oder langsam bewegten Rostbahn auf und bildet ein Schüttwerk. Von unten werden der Rost und die Schüttung von der Verbrennungsluft mit relativ geringer Anströmgeschwindigkeit durchströmt. Dieses Verfahren kommt speziell bei Biomasse in Form von Sägespänen, Pellets oder Hackgut sowie bei der Müllverbrennung zum Einsatz. Im Vergleich mit anderen Systemen weist dieses den geringsten Druckverlust über das Brennstoffbett, jedoch auch den geringsten Wärmeübergangskoeffizienten auf. Der Druckverlust steigt linear mit Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit der Luft an.

Bei einer Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit der Verbrennungsluft erreicht man den Lockerungspunkt der Schüttung, bei dem der Gesamtdruckabfall in der Schüttung gleich dem Gegendruck des Feststoffgewichtes ist. Bei der nun einsetzenden Fluidisierung der Schüttung kommt es zu einer intensiven Durchmischung der Brennstoffschicht und die Schüttung geht in eine Wirbelschicht über. Bei kleineren Gasgeschwindigkeiten bleibt eine definierte Bettoberfläche erhalten und man spricht von einer stationären Wirbelschicht. Bei steigender Anströmgeschwindigkeit kommt es zu einer Expansion der Wirbelschicht und kleine Partikel werden aus der Schicht nach oben ausgetragen. Der schnelle Austrag führt zu einer kurzen Verweilzeit für die kleinen Partikel und zu einem schlechten Brennstoffausbrand. Deshalb wird der ausgetragene Feststoff über einen Heißgaszyklon von den austretenden Verbrennungsgasen abgetrennt und dem Brennstoff wieder rückgeführt. In diesem Fall spricht man von einer zirkulierenden Wirbelschicht. Der Druckverlust in der Wirbelschicht ist über einen weiten Bereich konstant bei steigender Anströmgeschwindigkeit. Erst bei sehr hoher Luftgeschwindigkeit steigt der Druckverlust markant an. Der Wärmeübergangskoeffizient weist bei mittlerer Anströmgeschwindigkeit ein Maximum auf.

Eine weitere Steigerung der Luftgeschwindigkeit führt zur Staubfeuerung. In diesem Fall wird ein fein gemahlener Brennstoff im Flug in der Brennkammer bei einem einmaligen Durchgang verbrannt. Der Druckverlust über die Staubfeuerung sowie der Wärmeübergangskoeffizient steigen mit Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit der Verbrennungsluft an (siehe Abbildung 7).

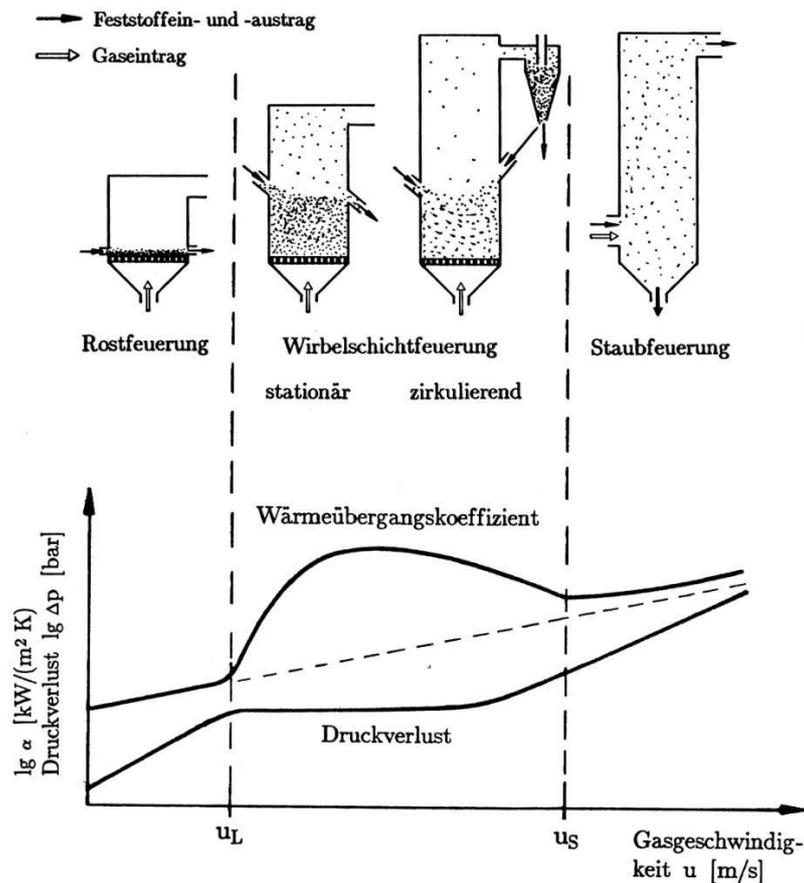


Abbildung 7: Einteilung von Feststoffverbrennungssystemen

Erläuterung: u_L ...Lockerungsgeschwindigkeit [m/s], u_S ...Sinkgeschwindigkeit [m/s], Quelle [7]

Die Lockerungsgeschwindigkeit u_L beschreibt jenen Punkt, bei dem eine Minimalfluidisierung erreicht wird, und der Gesamtdruckabfall in der Schüttelschicht gleich dem Gegendruck des Feststoffgewichtes ist. Die Sinkgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit, mit der ein Partikel durch die Schwerkraft nach unten sinkt. Übersteigt die Gasgeschwindigkeit die Sinkgeschwindigkeit eines Partikels in der Brennkammer, so wird dieses nach oben ausgetragen. Ist die die Sinkgeschwindigkeit eines Partikels größer der Gasanströmgeschwindigkeit so wird dieses nach unten abgeschieden.

3.2 Einflussfaktoren auf Flammencharakterisierung in Biomasse Rostfeuerungen

In dieser Diplomarbeit liegt der Fokus auf der experimentellen Charakterisierung der Strahlenbildung sowie niedrigturbulenten Strömungsbereichen in Biomasse-Feuerungen, damit also insbesondere auf dem Bereich über dem Brennstoffbett. Eine wichtige Größe bei dem Betrieb von Rostfeuerungen stellt die Brennstoffschüttung dar, wodurch die Anströmgeschwindigkeit für den Rost und die Schüttung maßgeblich beeinflusst wird. Die Strömungsgeschwindigkeit wirkt sich unmittelbar auf die Strahlenbildung und die Flammenform im Bereich über der Brennstoffschüttung aus. Eine weitere ausschlaggebende Einflussgröße auf die Strahlenbildung und die Flammenform ist die Art des Brennstoffs. Die Größe der Brennstoffstücke kann sehr unterschiedlich sein sowie auch deren Schüttdichte, wodurch das Strömungsverhalten des Brenngases sowie der Luft maßgeblich beeinflusst wird.

In der Realität tritt bei durchströmten Schüttungen, speziell bei kleinen Partikelgrößen, oft eine Tunnelbildung auf. Dies bedeutet, dass die Luft bzw. das Gas nicht überall gleichmäßig verteilt durch die Schüttung strömt, sondern bevorzugt an bestimmten Stellen und dort Strömungstunnels in der Schüttung gebildet werden. Diese Art der Durchströmung ist unerwünscht in durchströmten Schüttungen. Das Phänomen wird in dieser Arbeit nicht näher betrachtet und auch nicht in die mathematische Beschreibung der durchströmten Brennstoffschüttung in Rostfeuerungen aufgenommen.

Die Beschreibung von Partikeln ist mathematisch am einfachsten, wenn die Partikel eine Kugelform aufweisen. Da fast bei allen technischen Feststoffen die Teilchenform von einer Kugel abweicht, müssen äquivalente Kugeldurchmesser für deren einfachere Handhabung definiert werden. Die häufigsten verwendeten Äquivalentdurchmesser sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Maßeinheit für den jeweiligen Durchmesser wird nach der Dimension der Partikel gewählt und kann von Nanometer bis Meter angegeben sein.

Tabelle 2: Äquivalente Kugeldurchmesser

Symbol	Bezeichnung	Beschreibung
d_p	Siebäquivalenter Durchmesser	Durchmesser der Kugel mit der gleichen Siebfraction des Partikels
d_v	Volumenäquivalenter Durchmesser	Durchmesser der Kugel mit dem gleichen Volumen des Partikels
d_{sv}	Oberflächen-/Volumenäquivalenter Durchmesser	Durchmesser der Kugel mit dem gleichen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen wie das Partikel (Sauter-Durchmesser)
d_s	Oberflächenäquivalenter Durchmesser	Durchmesser der Kugel mit der gleichen Oberfläche wie das Partikel

Durch eine Kombination von verschiedenen Äquivalentdurchmessern oder durch Beziehen eines Äquivalentdurchmessers auf eine Geometriegröße können so genannte Formfaktoren gebildet werden, welche eine Beschreibung des Brennstoffs zulassen. In dieser Arbeit wird die Charakterisierung der Brennstoffform mittels des Formfaktors ψ aus Formel 2 vorgenommen. Dieser Formfaktor setzt zwei Äquivalentdurchmesser zueinander in Relation und wird auch Sphärizität genannt.

$$\psi = \left(\frac{d_v}{d_s} \right)^2$$

Formel 2: Formfaktor (=Sphärizität)

Erläuterung: ψ ...Formfaktor [-], d_v ...Volumenäquivalenter Kugeldurchmesser [Längenmaß], d_s ...Oberflächenäquivalenter Kugeldurchmesser [Längenmaß]

Es gibt keine standardisierten Methoden zur Bestimmung des Formfaktors. Als Anhaltswert soll Abbildung 8 herangezogen werden. Für drei geometrisch regelmäßige Körper 1,2, und 3 sind die zugehörigen Formfaktorverläufe und der Heywoodfaktor f dargestellt. Der Heywoodfaktor wird in dieser Arbeit nicht verwendet und es wird auch nicht näher darauf eingegangen.

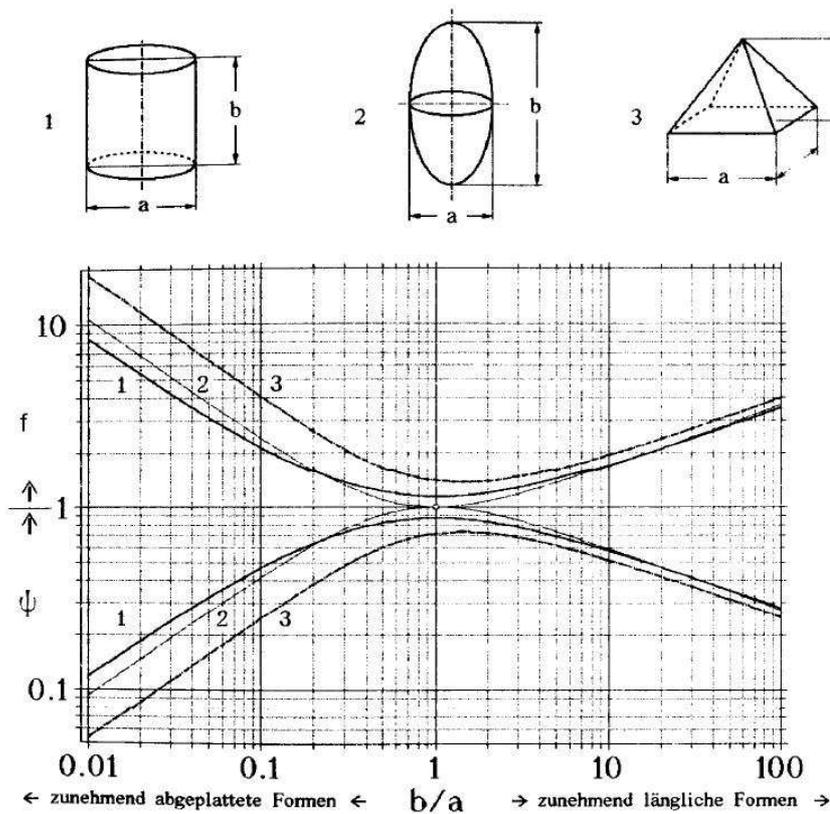


Abbildung 8: Formfaktorverläufe

Erläuterung: Quelle [8]

Als Rechenbeispiel wird hier die Sphärizitätsberechnung für typische Holzpellets für Kleinfeuerungen, welche nach der europäischen Norm EN 14961-2 [9] definiert sind, durchgeführt. Basierend auf dieser europäischen Norm, auf welche in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird, werden folgende Längenmaße für das Rechenbeispiel verwendet. Zur Berechnung der Sphärizität wird der geometrische Körper 1 aus Abbildung 8 verwendet. Für Holzpellets mit einem Durchmesser von 6mm und einer Länge von 20 mm ergibt sich ein b/a Faktor von 2,33. Dies entspricht einer Sphärizität $\psi = 0,77$.

Um das Brennstoffbett zu charakterisieren, benötigt man die Schüttdichte bzw. Bettdichte. Sie beschreibt die durchschnittliche Dichte der Schüttung, welche in Formel 3 definiert ist.

$$\rho_b = \frac{M}{V_b}$$

Formel 3: Schüttdichte

Erläuterungen: ρ_b ... Schüttdichte [kg/m^3], M ...Masse aller Partikel [kg], V_b ...Schüttvolumen bzw. Bettvolumen [m^3], Quelle [8]

Die Schüttdichte hängt mit der Partikeldichte über die Bettporosität zusammen. Die Porosität ist das Verhältnis des Zwischenvolumens zum Gesamtvolumen des Brennstoffbettes. Sie stellt eine weitere wichtige Größe zur Charakterisierung des Brennstoffbetts in Rostfeuerungen dar. Bei Holzpellets der Norm EN 14961-2 wird eine Schüttdichte größer 600 kg/m^3 angesetzt [9].

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{Hohlraumvolumen}}}{V_{\text{Gesamtvolumen}}} = 1 - \frac{M}{\rho_P \cdot V_b} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_P}$$

Formel 4: Porosität des Brennstoffbetts

Erläuterung: ε ...Porosität des Brennstoffbetts [-], M ...Masse aller Partikel [kg], V_b ...Volumen des Brennstoffbetts [m^3], ρ_b ...Dichte des Brennstoffbetts [kg/m^3], ρ_P ...Dichte der Brennstoffpartikel [kg/m^3], Quelle [8]

Die mittlere effektive Geschwindigkeit der Strömung innerhalb der Schüttschicht ist anhängig von der Porosität. In der Realität treten aus dem Brennstoff Pyrolysegase aus und durchströmen zusätzlich zur Luft das Brennstoffbett. Sie werden bei der Berechnung der mittleren effektiven Geschwindigkeit nicht berücksichtigt, da sie nur einen geringen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit haben.

$$u_{\text{eff}} = \frac{u_L}{\varepsilon}$$

Formel 5: Mittlere effektive Strömungsgeschwindigkeit im Brennstoffbett

Erläuterungen: u_{eff} ...mittlere effektive Strömungsgeschwindigkeit im Brennstoffbett [m/s], u_L ... Geschwindigkeit der Luft beim Anströmen des Brennstoffbetts [m/s], ε ... Porosität des Brennstoffbetts [-]

Bei einer großen Porosität, d.h. großen Hohlräumen im Brennstoffbett, wird der Luftstrom welcher von unten durch den Rost in den Feuerraum eingebracht wird, nur geringfügig beschleunigt. Bei einer kleinen Porosität hingegen, d.h. es liegt ein kleines Hohlraumvolumen vor, erhöht sich die Geschwindigkeit der Strömung im Brennstoffbett erheblich.

3.3 Charakteristische Kenngrößen in Rostfeuerungen

In Tabelle 3 sind charakteristische Betriebsgrößen von Biomassefeuerungen dargestellt. Die Temperaturbereiche ergeben sich aufgrund des Bernstoffs, der Luftführung und der Brennkammereinbauten. Die Geschwindigkeiten über dem Brennstoffbett sind von der Form des Brennstoffs, von der Schüttung und der Luftströmungsgeschwindigkeit abhängig. Die maximalen Gasgeschwindigkeiten treten im Feuerraum durch Umlenkung der Strömung bei Einbauten in der Brennkammer auf. Das Lambda der Primärzone liegt für Rostfeuerungen im unterstöchiometrischen Bereich bzw. typischerweise bei 40-70% vom Gesamtlambda. Der Reynoldsbereich über dem Brennstoffbett wurde mit folgenden Randbedingungen abgeschätzt: Gasgeschwindigkeit = 1 bis 6 m/s, charakteristische Länge = 5 bis 100, kinematische Viskosität des Biomasse-Holzgasgemisches bei 25 bis 100 °C. Die charakteristische Längen beziehen sich von kleine Holzpellets bis zu großen Hackschnitzel. Kleine Holzpellets sind mit einem Durchmesser von 6 mm, einer Länge von 30 mm und große Hackschnitzel mit einem Durchmesser von 35 mm und einer Länge von 100 mm definiert [10].

Bei der Verbrennung von Biomasse entsteht, aufgrund der thermischen Einwirkung, eine für Biomasse-Rostfeuerungen typische Gasmischung, welches sich ungefähr aus folgenden Volumenanteilen zusammensetzt: 12 Vol% CH₄, 2 Vol% H₂, 18 Vol% CO, 60 Vol% N₂, 8 Vol% CO₂. Bei der vollständigen Verbrennung reagieren diese Gase unter Wärmefreisetzung zu H₂O und CO₂.

Tabelle 3: Charakteristische Größen für Rostfeuerungen

Erläuterung: * Quelle [11], ** Quelle [12], *** Quelle [13], **** Quelle [14],

Charakteristische Größe	Zahlenwert	Einheit
Adiabate Verbrennungstemperatur *	950 - 1500	[°C]
Feuerraumtemperatur *	750 - 1300	[°C]
Gasgeschwindigkeit über dem Brennstoffbett ** ' ***	1 - 6	[m/s]
Gasgeschwindigkeit im Feuerraum **	4 - 20	[m/s]
Lambda Primärzone *** ' ****	0,4 - 1,6	[-]
Lambda gesamt ** ' ****	1,1 - 2,3	[-]
Reynoldsbereich über dem Brennstoffbett	150 - 37000	[-]

4 Messverfahren

Der Flammenreaktor wurde konzipiert, um den Einfluss von Gasgeschwindigkeiten im niedrig turbulenten Bereich sowie den Einfluss von der Strahlenbildung auf den Mischungsfortschritt und die Gasphasenverbrennung zu untersuchen. Die wichtigsten Einflussgrößen sind die Temperatur, die Gasgeschwindigkeit und Spezieskonzentrationen. Der Reaktor wurde ausgelegt, um diese Einflussgrößen sowohl in kalten Strömungen wie auch in Flammen messen zu können. Über Probenahmestutzen am Reaktor können aus der Gasströmung mit extraktiven Verfahren Proben entnommen werden, welche zur Spezieskonzentrationsmessung verwendet werden. Über einen optischen Zugang, können mit berührungsfreien Verfahren die Gasgeschwindigkeiten, die Spezieskonzentrationen und die Temperatur gemessen werden.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden extraktive RGA und FTIR Konzentrationsmessungen und berührungsfreie LDA Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Ausgewertet und diskutiert werden in dieser Diplomarbeit die Konzentrationsmessungen mit RGA in kalter Strömung und die Konzentrationsmessungen mit RGA sowie FTIR in Flammen. .

4.1 Motivation für Messungen in kalten Strömungen

Die Versuche in kalter Strömung wurden durchgeführt, um die Durchmischung in der lamina- ren bis niedrig turbulenten Strömung, sowie den Mischungsfortschritt aufgrund der Strahlen- bildung zu charakterisieren. Im Vergleich zu Messungen in Flammen sind die Ergebnisse einfacher zu erhalten. Die Durchmischung ist nicht beeinflusst vom Verbrennungsprozess, wie z.B. der Expansion des Gases oder der Speziesänderung bei chemischer Reaktion, sowie Flammen-Instabilitäten.

Unter Berücksichtigung dieser Strömungssituation gilt es verschiedene Konzentrationsprofile zu vermessen, um die Vermischung besser verstehen zu können. Als Gasströme für die kalten Experimente wird ein Versuchsgasgemisch und Luft verwendet. Das Versuchsgasgemisch besteht aus CO_2 und N_2 . Dieses Versuchsgasgemisch im Zentrum der Messkammer wird von einem Luftmantel umgeben. Die CO_2 -Spezies im Gasgemisch fungiert als Tracergas, welches von den Messinstrumenten zur Konzentrationsmessung erfasst werden kann.

4.2 Motivation für Messungen in Flammen

Die Flammenversuche wurden durchgeführt, um die Vermischung von Gasströmen unter Berücksichtigung des thermischen und chemischen Einflusses zu betrachten. Ein Beispiel für einen thermischen Effekt ist die Expansion des Gases bei Temperaturzunahme und als relevanter chemischer Effekt tritt die Speziesänderung bei der Verbrennung auf. Durch die Expansion des Gases wird das Gas beschleunigt. Dies führt zur Erhöhung der Turbulenz, wodurch eine schnellere Durchmischung erzeugt wird. Durch die Speziesänderung verschieben sich die Konzentrationsunterschiede, wodurch wiederum die Geschwindigkeit der Diffusion beeinflusst wird.

Unter Berücksichtigung dieser komplexen Strömungssituation gilt es verschiedene Konzentrationsprofile zu vermessen, um die Vermischung besser verstehen zu können. Als Gasströme für die Flammenexperimente werden ein brennbares sowie mit den Messinstrumenten messbares Versuchsgasgemisch und Luft verwendet. Das Versuchsgasgemisch besteht aus CH_4 und Luft. Weiteres wird diese Gasströmung von einem Luftmantel umgeben.

4.3 Überblick über die verwendeten Messgeräte

Es standen folgende drei unterschiedliche Messgeräte zur Konzentrationsmessung und Geschwindigkeitsmessung zur Verfügung

- Ein Gasanalysegerät zur Konzentrationsbestimmung von CO_2 , CO , H_2O und CH_4 , welches als Messverfahren das Fourier Transformations Infrarot Spektroskopie Verfahren verwendet. In dieser Diplomarbeit wird das Messgerät kurz FTIR genannt.
- Ein Gasanalysegerät zur Konzentrationsbestimmung von CO_2 , CO und O_2 , welches das Infrarot-Absorptions-Verfahren zur Konzentrationsbestimmung von CO_2 und CO sowie das paramagnetische Verfahren zur Konzentrationsbestimmung von O_2 verwendet. Das Gerät wird Rauchgasanalyse-Einheit genannt und in dieser Diplomarbeit kurz als RGA bezeichnet.
- Ein Laser zur Bestimmung der Gasgeschwindigkeiten, in kalten Gasströmungen und Flammen, welcher zur Messung das Laser Doppler Anemometrie Verfahren benutzt. In dieser Diplomarbeit wird dieses Gerät als LDA bezeichnet.

Zur Konzentrationsmessung werden kontinuierlich Gasproben mittels einer Pumpe aus dem Strömungsbereich im Flammenreaktor über eine Probenahmelanze entnommen. Diese werden den Analysegeräten zugeführt für deren Auswertung. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt

berührungsfrei über einen Laser. Die Sichtverbindung zwischen Laserkopf und der Gasströmung wird mittels eines Glasfensters im Flammenreaktor ermöglicht.



Abbildung 9: Gaskonzentrations Analyse-Gerät mit Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie-Verfahren (FTIR) und Pumpe



Abbildung 10: Gaskonzentrations Analyse-Gerät mit Infrarot-Absorptions- und paramagnetischem Verfahren (RGA)



Abbildung 11: Gasgeschwindigkeit Analyse-Gerät mit Laser Doppler Anemometrie Verfahren (LDA)

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Messungen in kalten Strömungen mittels FTIR, RGA und LDA durchgeführt sowie in Flammen mittels FTIR und RGA. Bei den kalten Konzentrationsmessungen wurde CO_2 als Tracergas in einem $\text{CO}_2/\text{N}_2/\text{Luft}$ gemisch verwendet und gemessen. Für die Geschwindigkeitsmessungen wurden Öltröpfchen über eine Seeding-Einheit in das Gasgemisch eingebracht. Bei den Flammenversuchen wurde ein CH_4/Luft gemisch verwendet. Für die Konzentrationsmessungen wurden die reagierenden Spezies CH_4 , CO_2 , H_2O , O_2 und CO gemessen.

Da sich die Messmatrix im Laufe der Diplomarbeit geändert hat, wurden aus Zeitgründen für die finalen Messungen nur Konzentrationsmessungen mit der FTIR und RGA durchgeführt, wobei für die Messergebnisse in kalter Strömung nur die RGA Messergebnisse aufgrund der höheren Messsicherheit verwendet wurden. Geschwindigkeitsmessungen mit der LDA in Flammen wurden nicht durchgeführt, da notwendige Apparate wie ein Elektrofilter oder eine Seeding Einheit für Titandioxid Partikel nicht geklärt und eingebaut waren.

4.4 Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie-Verfahren zur CO₂-, CO-, H₂O- und CH₄-Gaskonzentrationsmessung

Das Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie Verfahren basiert auf einem Messverfahren mittels Interferometer und einer Fourier-Transformation der gemessenen Daten zur Bestimmung der Konzentration verschiedener Gase.

Ein Interferometer ist ein optischer Aufbau, der dazu dient, Lichtbündel (Wellen) zu trennen, sie räumlich gegeneinander zu verschieben und wieder zu überlagern. Das einfachste bekannte Interferometer ist das Michelson-Interferometer. Das einfallende, parallele Lichtbündel aus der Quelle wird an der aktiven Schicht eines Strahlteilers in zwei, am besten gleich intensive, Teile aufgespaltet. Ein Teil reflektiert am Stahlteiler zu einem fest stehenden Spiegel im Referenzarm und dient als Referenz. Der andere Teil transmittiert zu einem bewegten Spiegel im Messarm. Beide Teile werden am jeweiligen Spiegel zum Strahlteiler zurück reflektiert und wiedervereinigt (siehe Abbildung 12).

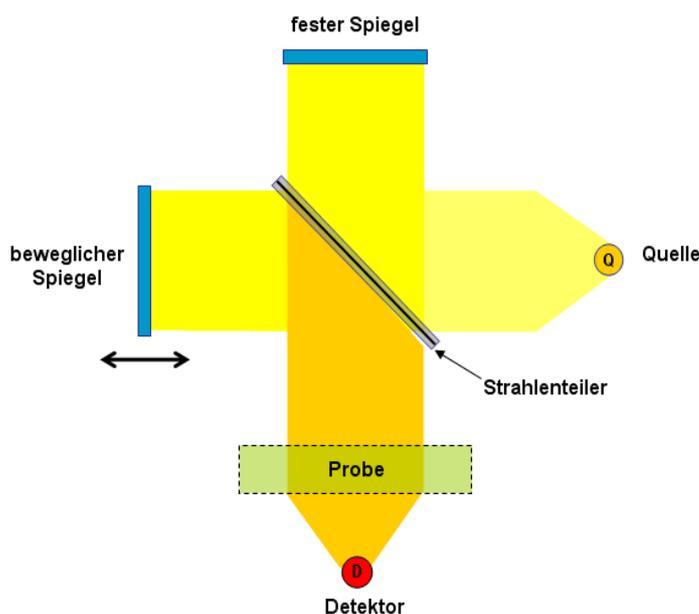


Abbildung 12: Schematischer Aufbau eines Interferometers

Entsprechend der Position des beweglichen Spiegels besitzen beide Teilbündel eine Laufzeit- bzw. Wegdifferenz was zu Interferenzen zwischen beiden detektierten Wellenbildern führt. So erhält man ein Interferogramm mit einem großen Maximum dort und relativ flachen Ausläufern. Dort, wo beide Spiegel gleich weit vom Strahlenteiler entfernt waren und somit alle Frequenzen additiv interferiert haben, befindet sich das Maximum (siehe Abbildung 13). Aufgrund von Fertigungstoleranzen der Interferometerarme ist es oft möglich, dass die Symmetrie des Interferogramms nicht vollständig ausgeprägt ist.

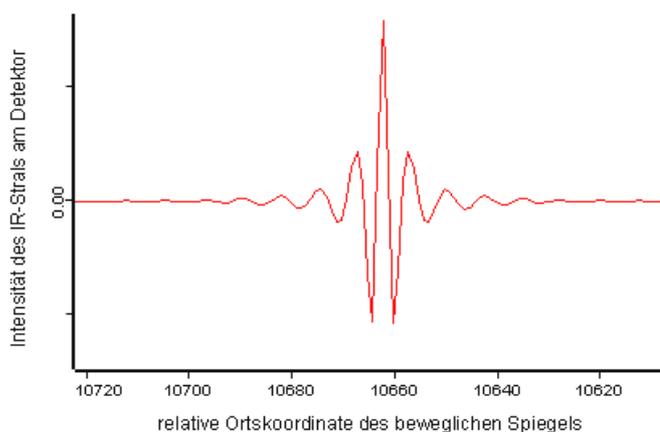


Abbildung 13: FTIR-Interferogramm vor Fourier Transformation

Das Interferogramm wird dann durch eine mathematische Operation, genannt Fourier Transformation, in ein Spektrum umgewandelt und man erhält das Einstrahlspektrum. Es beinhaltet die Energieverteilung der Lichtquelle, die Transmissionsfunktion des Spektrometers und die Empfindlichkeit des Detektors. Das Extinktionsspektrum einer Probe berechnet sich durch Aufnahme des Einstrahlspektrums der Referenz und des Einstrahlspektrums der Probe (siehe Abbildung 14).

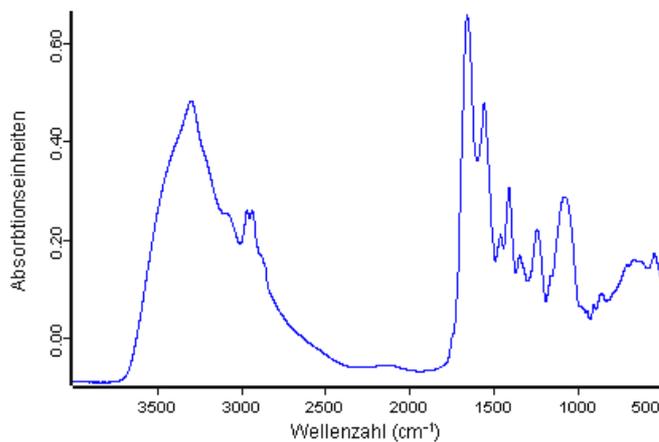


Abbildung 14: FTIR-Interferogramm nach Fourier Transformation

Jedes chemische Element und jeder chemische Verbindung schwingen in einem bestimmten Wellenlängenbereich. Mit Hilfe von gespeicherten Referenzspektrogrammen kann man somit unbekannte chemische Zusammensetzungen und die Konzentrationen bestimmen [15, 16].

4.5 Infrarot-Absorptions Verfahren zur CO- und CO₂-Gaskonzentrationsmessung

Eine der wichtigsten Methoden zur Bestimmung von Gasarten und deren Konzentration in einem Gasmisch ist die photometrische Messung der Strahlungsabsorption einer Gassäule (siehe Abbildung 15). Je nach Gasart liegt die Wellenlänge der absorbierten Strahlung im ultravioletten, im sichtbaren oder im infraroten Bereich des Wellenspektrums.

Bei dem Infrarot Absorptions Verfahren (IR-Messung) wird die durch das Messgas absorbierte Infrarotstrahlung erfasst. Die Wellenlänge der absorbierten Wellenbanden ist ein Maß für die Gasart und die Stärke der Absorption ein Maß für die Gaskonzentration. Ein Detektor erfasst zeitlich aufeinanderfolgende Signale, wobei sich immer ein konzentrationsunabhängiges und ein konzentrationsabhängiges Signal abwechseln. Das konzentrationsunabhängige Signal dient als Nullpunkt für die Konzentrationsangabe. Die Differenz beider Signale dient als Maß für die Konzentration, welche zwischen wenigen ppm und 100 % bestimmt werden kann. Die minimal messbare Konzentration hängt von der Absorptionsstärke des zu messenden Gases ab.

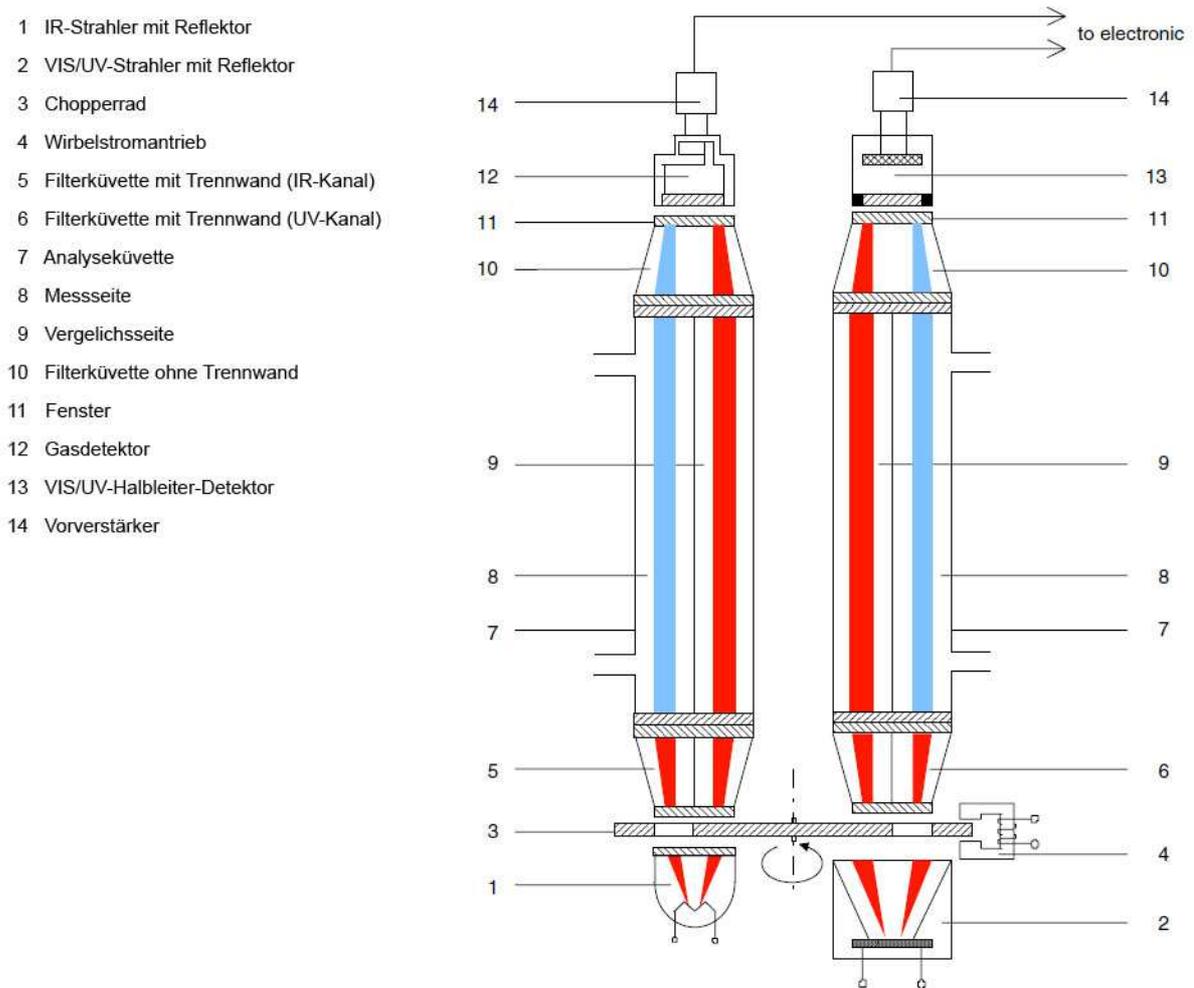


Abbildung 15: Infrarot-Absorptionsmessprinzip (und ultraviolett Absorptionsmessprinzip)

Für die Messung erzeugt eine Heizwendel die nötige IR-Strahlung. Diese durchläuft, in zwei Strahlungsbündeln gleicher Intensität geteilt, die aus Mess- und Vergleichsseite bestehende Analysenküvette. Eine daran anschließende Filterküvette sibt störende Strahlungsbereiche aus dem Strahlungsspektrum aus und sorgt für die Anpassung an den Öffnungsquerschnitt des Detektors. Unter der Filterküvette läuft das Lichtzacker- oder Chopperrad in einem staubdichten Gehäuse. Seine besondere Formgebung führt in Verbindung mit einer Regелеlektronik zu einer hohen Empfindlichkeitsstabilität. Der pneumatische Strahlungsdetektor erfasst selektiv die vom Chopperrad abwechselnd freigegebenen Strahlen aus Mess- und Vergleichsseite und setzt sie in intensitätsproportionale Spannungen um.

Der IR-Detektor besteht aus einer gasgefüllten Absorptionskammer, die über ein spezielles Fenster von der Infrarotstrahlung durchdrungen wird, sowie aus einer Ausgleichskammer, die die erstere ringförmig umgibt. Diese beiden Kammern stehen über einen Strömungskanal miteinander in Verbindung.

Grundsätzlich wird der Detektor mit dem gleichen Infrarot-aktiven Gas gefüllt, das auch vom Analysator gemessen werden soll. Der Detektor ist daher nur für ein bestimmtes Gas sensibilisiert und nur innerhalb des vom Füllgas bestimmten Wellenlängenbereichs für Strahlung empfindlich. Wird durch das Gas im Detektor ein Teil der Strahlung absorbiert, so erwärmt sich das Gas, dehnt sich aus und strömt zum Teil durch den Verbindungskanal in die Ausgleichskammer. Diese Strömung wird von einem Mikro-Strömungsfühler erfasst und in eine elektrische Spannung umgesetzt. Der Verbindungskanal ist so dimensioniert, dass er die Ausgleichsströmung durch Drosselung kaum behindert. Die Chopperscheibe sorgt dafür, dass der Strömungsvorgang periodisch wiederkehrt, da die Abkühlung des Gasvolumens zu einer Rückströmung führt.

Bei der Absorptionsmessung im UV-Bereich ist die Messanordnung ähnlich wie bei der IR-Messung. Als Strahlungsquelle wird eine Gasentladungslampe benutzt. Die Strahlung dieser UV-Lichtquelle wird durch eine Blenden-Linsenordnung in die zweigeteilte Küvette geleitet. Hinter dieser Analysenküvette befindet sich eine zweite Linse, in deren Brennpunkt sich der Detektor befindet.

Das Chopperad erzeugt dann aus Mess- und Vergleichsstrahl Licht-Pulse unterschiedlicher Intensität. Dabei entspricht die Intensitätsdifferenz zwischen Mess- und Vergleichsgas der Konzentrations- bzw. Absorptionsdifferenz. Der verwendete Detektor ist ein Foto-Detektor, der die auftreffenden, konzentrations- proportionalen, unterschiedlichen Licht-Pulse direkt in entsprechende Spannungspulse umsetzt [17].

4.6 Paramagnetisches Verfahren zur O₂-Gaskonzentrationsmessung

Die O₂-Messung des Analysegerätes nutzt die paramagnetischen Eigenschaften des Sauerstoffmoleküls zur Konzentrationsbestimmung (siehe Abbildung 16). Zwei mit Stickstoff gefüllte Quarzkugeln (N₂ = diamagnetisch) sind hantelförmig angeordnet und im Inneren der Messzelle an einem dünnen, gespannten Platindraht leicht drehbar aufgehängt. Auf dem Draht befindet sich ein kleiner Spiegel, der einen Lichtstrahl in Richtung eines Fotodetektors gleitet. Außerhalb der eigentlichen Messzelle erzeugt ein starker Permanentmagnet ein inhomogenes Magnetfeld. Gelangen jetzt Sauerstoffmoleküle in die Messzelle, wird eine Kraft auf die beiden mit Stickstoff gefüllten Kügelchen ausgeübt. Es entsteht ein Drehmoment, welches die Hantel samt Spiegel aus der Ruhelage herausdreht. Dadurch wird auch der durch den Spiegel reflektierte Lichtstrahl abgelenkt. An die um die Kügelchen geführte Drahtschleife wird nun eine Spannung angelegt. Der hieraus resultierende Strom erzeugt Drehmoment auf die Hantel

kompensiert wird, ist ein direktes Maß für die Sauerstoffkonzentration. Die gesamte Messzelle besteht aus der Messkammer selbst, dem Dauermagneten, der Auswertelektronik und dem umgebenden Gehäuse. Zusätzlich werden noch ein Temperatursensor und ein Magnetfeld eingesetzt, welches die Drehbewegung kompensiert.

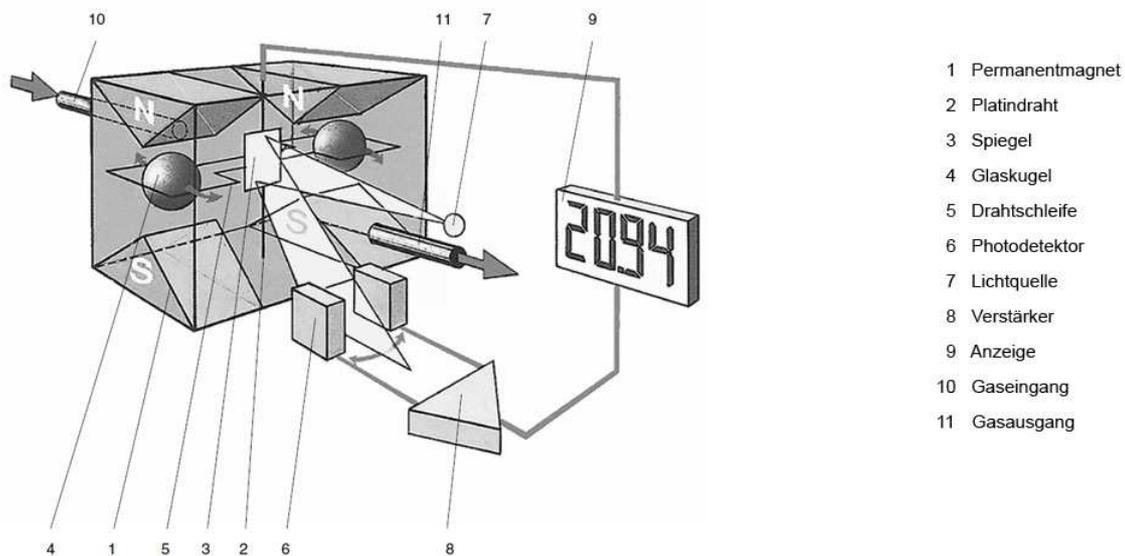


Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau der paramagnetischen Messkammer zur O₂-Konzentrationsmessung

Diese Stromstärke, mit der das Drehmoment auf die Hantel kompensiert wird, ist ein direktes Maß für die Sauerstoffkonzentration. Die gesamte Messzelle besteht aus der Messkammer selbst, dem Dauermagneten, der Auswertelektronik und dem umgebenden Gehäuse. Zusätzlich wird noch ein Temperatursensor eingesetzt, welcher die Messzelle auf einer konstanten Temperatur, bei MLT1 Geräten auf ungefähr 55 °C, hält [17].

4.7 Laser-Doppler-Anemometrie-Verfahren zur Gasgeschwindigkeitsmessung

Die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) ist ein berührungsloses optisches Messverfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitskomponenten in Flüssigkeits- und Gasströmungen (siehe Abbildung 17). Dieses Messverfahren bietet aufgrund der berührungsfreien Messung und der zeitlichen und räumlichen Auflösung eine sehr hohe Genauigkeit. Die zeitliche Messauflösung hängt prinzipiell von der Partikeldichte in der Strömung ab. Bei einer hohen Partikeldichte können Messfrequenzen im Bereich von MHz erzielt werden. Durch das sehr kleine Messvolumen im Mikrometerbereich kann eine sehr hohe räumliche Messauflösung in der

Strömung erzielt und somit kleinste Strömungswirbel erfasst werden. Außerdem kann die Strömungsrichtung eindeutig erfasst werden, woraus sich Rückschlüsse auf die Turbulenz in der Strömung ziehen lassen.

Mit dem LDA Verfahren ist es möglich lokale 2D Geschwindigkeitswerte und deren Richtung zu messen. Basierend auf diesen Messdaten können für jede Messposition die mittleren Geschwindigkeitskomponenten, die Geschwindigkeitsschwankung, die turbulente kinetische Energie und die Schwankungsgeschwindigkeiten in alle drei Koordinatenrichtungen berechnet werden.

Ein Laserstrahl wird mit Hilfe eines Strahlteilers in zwei Strahlen aufgeteilt. Am Messpunkt kreuzen sich diese Strahlen wieder. Um die Strömung vermessen zu können, müssen dem Fluid Tracerpartikel beigemischt werden, welche im Laserstrahl aufblitzen. Üblicherweise werden bei kalten Gasströmungen fein zerstäubte Öltröpfchen und bei Flammen Titandioxidpartikel oder Siliziumdioxidpartikel mit einem Durchmesser von 2 µm als Tracerpartikel verwendet. Die an diesem bewegten Teilchen gestreuten Lichtwellen besitzen durch den Doppler-Effekt leicht unterschiedliche Frequenzen. Ein Detektor misst die beiden Streuwellen, die von den Strömungspartikeln im Fluid erzeugt werden. Aus der Schwebung beider Wellen (dem Doppler-Burst) lässt sich die Geschwindigkeit des Tracerpartikel und somit der Strömung bestimmen [18,19].

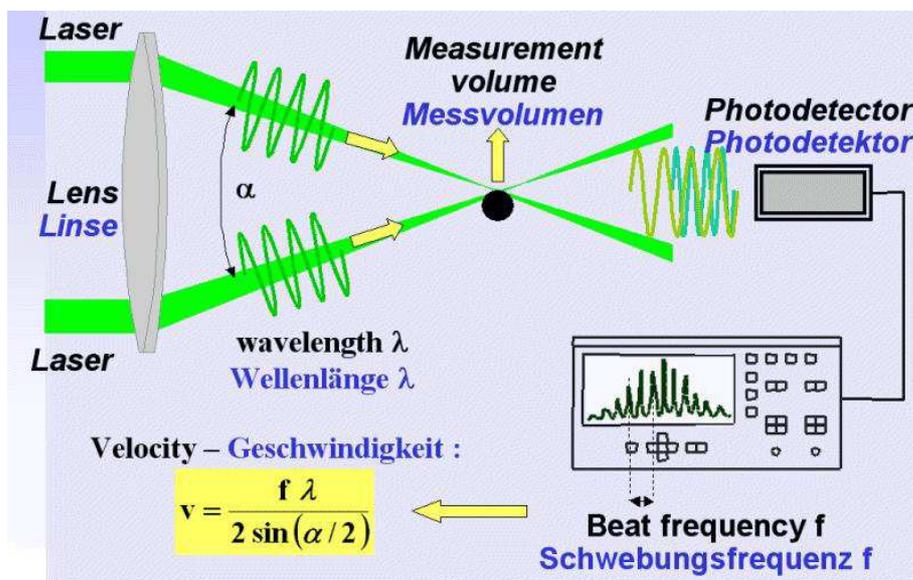


Abbildung 17: Schematischer Aufbau des Laser-Doppler-Anemometrie Verfahrens

Der Photodetektor kann in Vorwärtsstreuanordnung oder in Rückwärtsstreuanordnung aufgebaut werden. Wenn der Photodetektor in Vorwärtsstreurichtung installiert ist, wird das

von dem Partikel gestreute Signal von einer Empfangsoptik in Ausbreitungsrichtung des Lichts aufgenommen. Bei der Rückwärtsstreuanordnung ist der Detektor in entgegengesetzter Richtung der Ausbreitung beider Laserstrahlen angeordnet. Bei der Rückwärtsstreuanordnung kann die Sendeoptik so konstruiert werden, dass sie gleichzeitig die Empfangsoptik mit aufnimmt, so dass die aufwändige Justage zwischen Sende- und Empfangseinheit entfällt. Heutzutage finden fast ausschließlich LDA-Systeme mit Rückwärtsstreuanordnung ihre Anwendung [18]. Der Flammenreaktor wurde mit einem optischen Zugang konstruiert. Gasgeschwindigkeiten können über diesen optischen Zugang nur mit LDA-Systemen mit Rückstreuoptik vermessen werden.

5 Versuchsaufbau – Entwicklungsstufe 1

Der Versuchsaufbau besteht grundsätzlich aus einem Flammenreaktor, in dem eine kalte Strömung oder eine Gasflamme betrieben werden, einer Gasmischer-Station, welche den Reaktor mit diversen Gasen beaufschlagt und einem Absaugsystem, welches die verbrannten Abgase in die Umgebungsluft bläst. Es können extraktive Messgeräte, welche über Probenahmestutzen in die Messkammer einzuführen sind, verwendet werden. Über einen optischen Zugang in die Messkammer können berührungsfreie, optische Messverfahren angewendet werden (siehe Kapitel 4).

5.1 Auslegungskriterien für den Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1

Im Rahmen des Basic Engineerings bestehen folgende Auslegungskriterien:

- Bestmögliche Dämmeigenschaften des Reaktormantels
- Optischer Zugang in die Reaktorkammer (LDA-Gasgeschwindigkeitsmessungen in dieser Diplomarbeit angewandt)
- Extraktiver Gasentnahme-Zugang in die Reaktorkammer (FTIR- und RGA-Gasspezieskonzentrationsmessungen in dieser Diplomarbeit angewandt)
- Versuchsgasgemisch besteht aus 12 Vol% CH₄, 2 Vol% H₂, 18 Vol% CO, 60 Vol% N₂, 8 Vol% CO₂
- Versuchsgas soll variabel über verschiedene Öffnungen in den Reaktorraum eintreten können

- Unterdruck in der Reaktorkammer muss aus Sicherheitsgründen gewährleistet sein
- Materialauswahl für berechnete adiabate Flammentemperatur von 1300 °C

5.2 Fließbilder des Versuchsaufbaues der Entwicklungsstufe 1

Um die Größenordnung des Versuchsaufbaues und der zugehörigen Fließbilder besser verstehen zu können, ist in Abbildung 18 ein Foto des gesamten Versuchsaufbaues inklusive der FTIR-Messeinrichtung dargestellt.



Abbildung 18: Versuchsaufbau - Panoramagesamtansicht

Abbildung 19 bis Abbildung 23 zeigen Fließbilder der Versuchsanlage in verschiedenen Betriebszuständen. Das Fließbild in Abbildung 19 zeigt den gesamten Versuchsaufbau in der Entwicklungsstufe 1 noch ohne Anschlüsse für die Seedingeinheit. Abbildung 20 zeigt den Drucktest, welcher für die Gasleitungen der brennbaren und giftigen Gase durchgeführt wurde.

Die Zündung, gezeigt im Fließbild in Abbildung 21, erfolgt aus Sicherheitsgründen mit Propangas und Luft. Erst wenn die Flamme stabil brennt, wird das Versuchsgas dazu geregelt und danach das Propangas abgedreht. Der Betrieb mit Fensterspülung, welche allerdings ohne Seedingpartikel nicht benötigt wird, ist im Fließbild in Abbildung 22 dargelegt.

Nach Beenden der Versuche werden die Leitungen der Brenngase und des Kohlenmonoxids mit Stickstoff gespült, damit keine gefährlichen Rückstände in den Leitungen bleiben (siehe Abbildung 23).

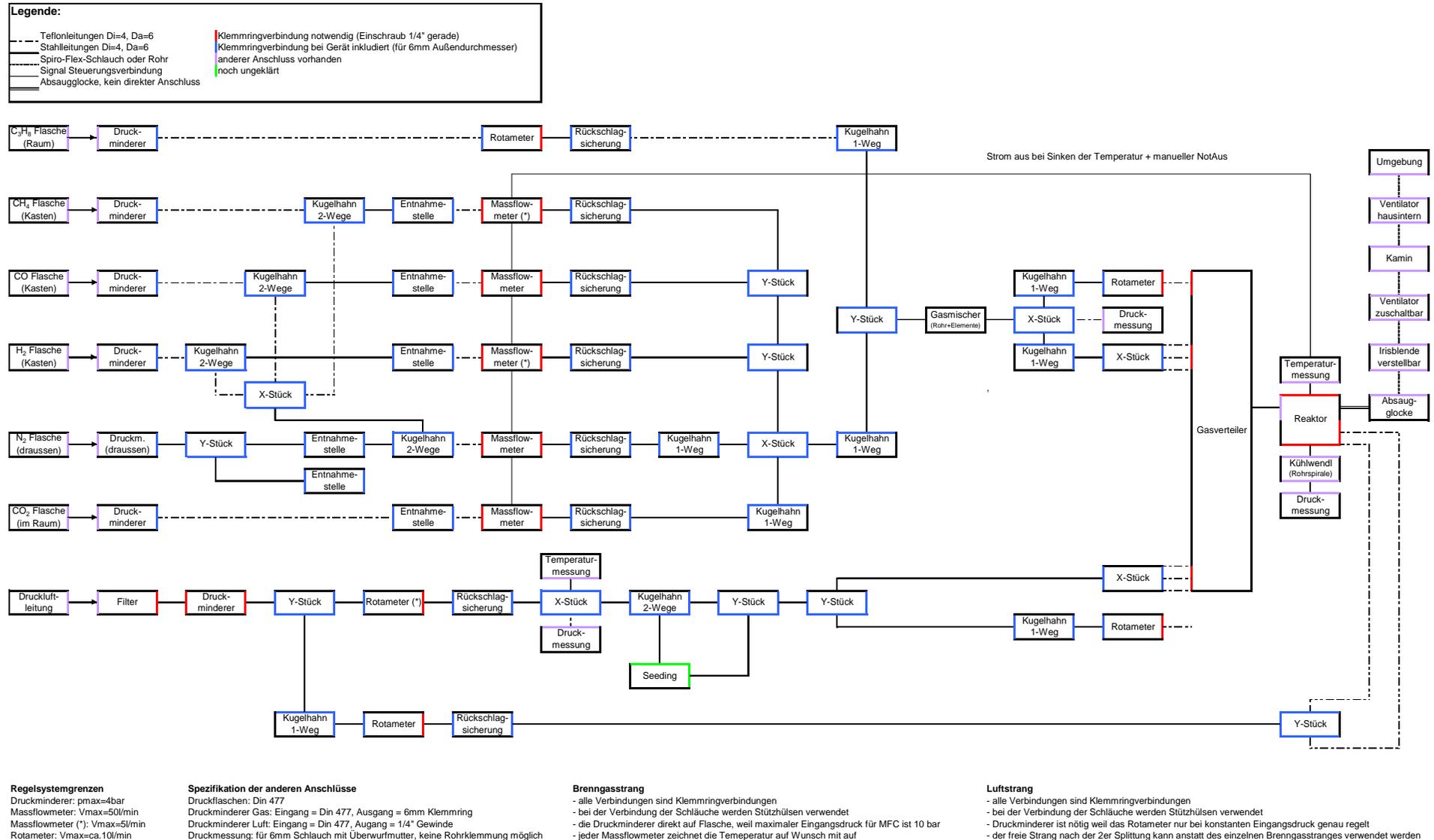


Abbildung 19: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1

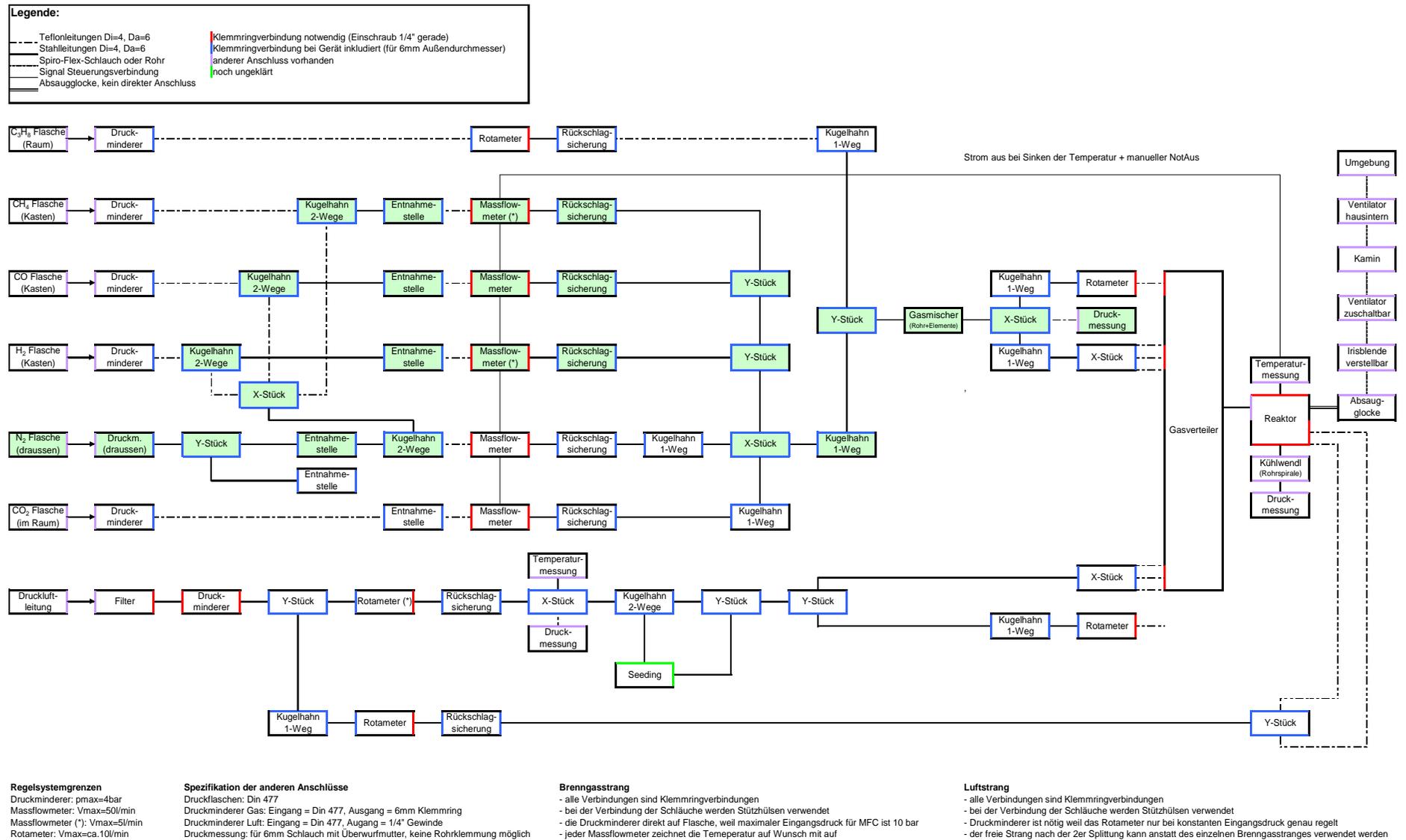


Abbildung 20: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1 – Drucktest

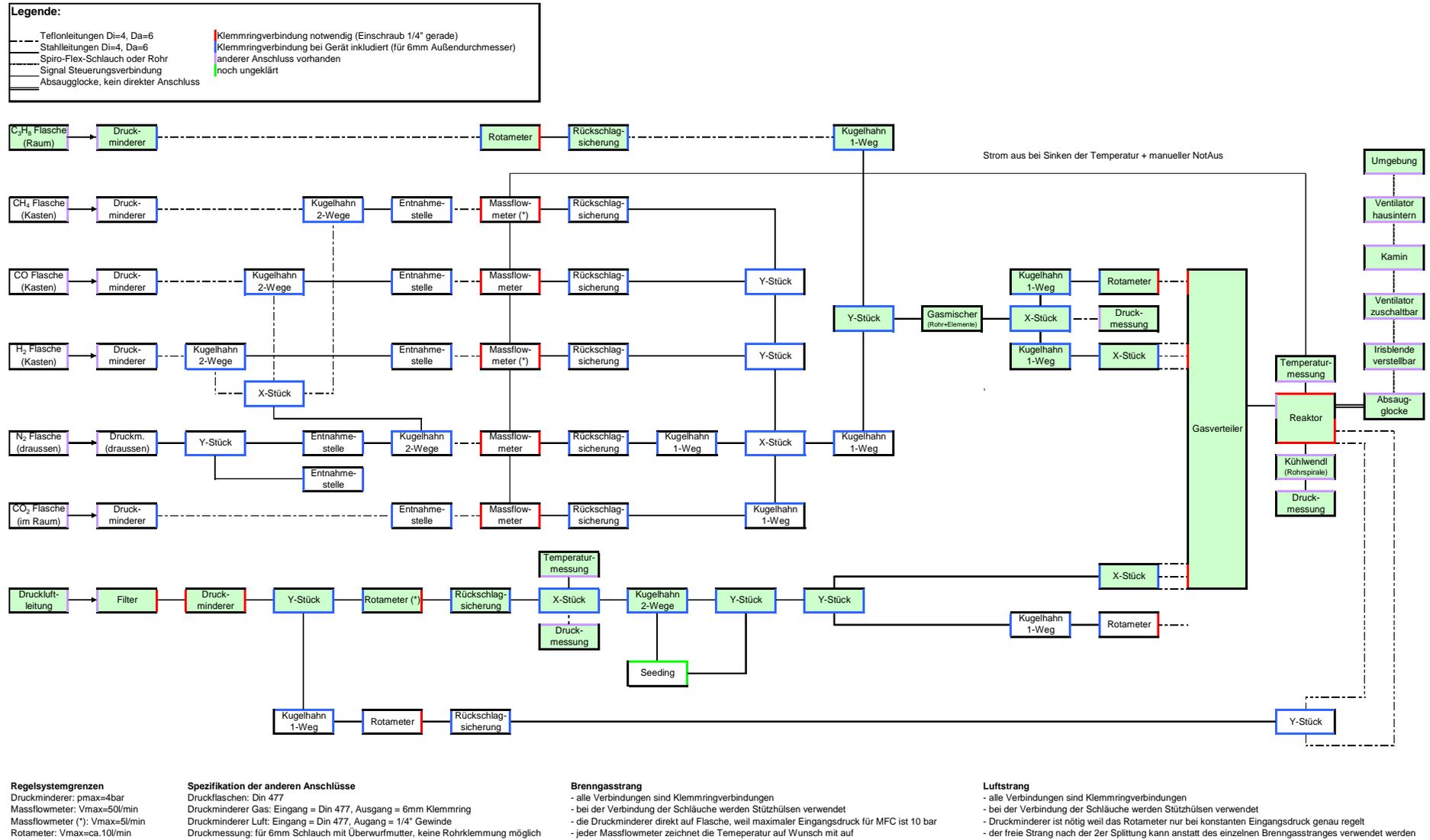


Abbildung 21: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1 – Zündung

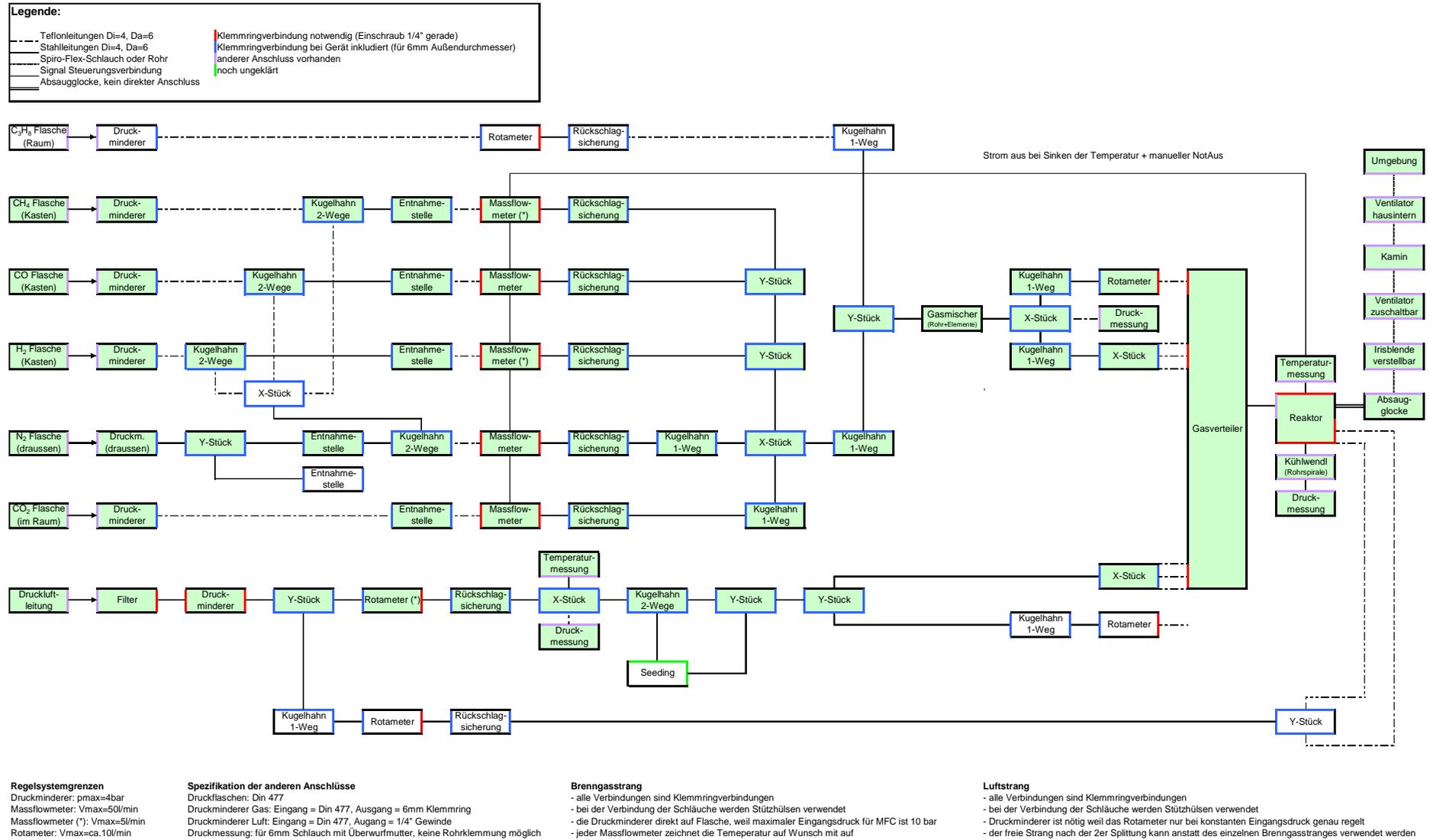


Abbildung 22: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1 – Betrieb

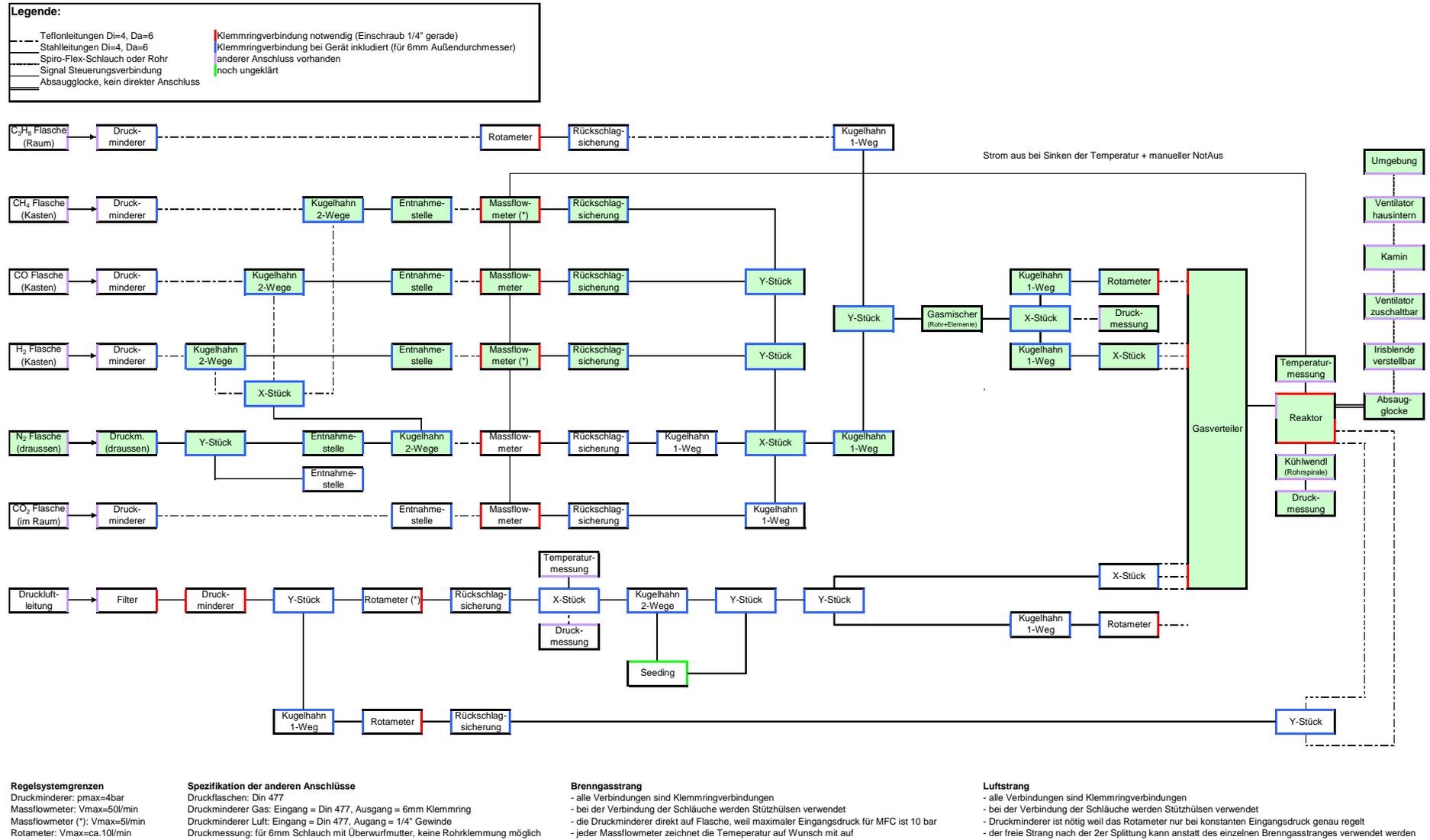


Abbildung 23: Fließbild vom Versuchsaufbau der Entwicklungsstufe 1 - Spülen

5.3 Gasmischer- und Gasteilerstation

In diesem Kapitel werden die Einheiten zur Erzeugung eines definierten Gasgemisches und der nachfolgenden Gasteilung auf verschiedene Leitungen im Detail näher beschrieben.

Abbildung 24 zeigt alle Systeme im Überblick.

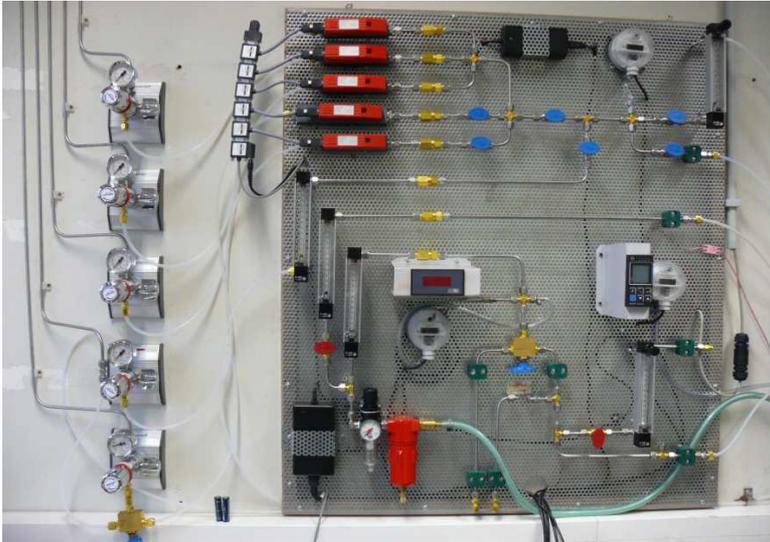


Abbildung 24: Gasmischer- und Gasteilerstation – Gesamtansicht

5.3.1 Gasentnahmestation

Es sind fünf Gasentnahmestationen für die einzelnen Versuchsgase H_2 , CH_4 , CO , CO_2 und N_2 der Bauart HiQ Redline als W40 Wandausführung montiert (siehe Abbildung 25). Der maximale Eingangsdruck der Gasentnahmestationen beträgt 40 bar und der Manometerbereich reicht von 0 bis 16 bar und der Regelbereich von 0,5 bis 10 bar. Die Gasentnahmestation für N_2 wird über eine Stahlleitung gespeist, welche mit dem Hauptgaslager außerhalb des Gebäudes verbunden ist. Die CO_2 -Gasentnahmestation wird über eine Teflonleitung von einer CO_2 -Flasche versorgt, welche im Laborraum verankert ist. Die weiteren Gasentnahmestationen für H_2 , CH_4 und CO sind über Stahlleitungen mit den jeweiligen Gasflaschen verbunden, welche sich in einem Sicherheitsgasschrank außerhalb des Laborraums befinden.

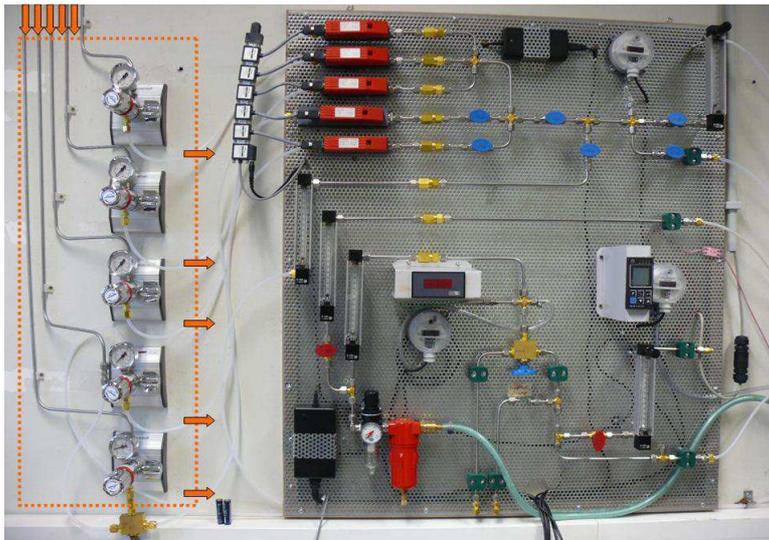


Abbildung 25: Gasentnahmestation

Die im Versuchsaufbau nachfolgenden Massendurchflusskontroller (MFC) sind auf 3bara Eingangsdruck kalibriert. Alle Gasentnahmestationen werden auf einen Druck von 3bara eingestellt.

5.3.2 Mischeinheit und Splittereinheit für Verbrennungsgas

Das Mischungsverhältnis des Versuchsgases wird über fünf MFC geregelt. Alle MFC sind durch Rückschlagventile vor einem eventuellen Flammenrückschlag gesichert. Die fünf Leitungen werden zusammengeführt und das Gas wird durch eine statische Mischeinheit geleitet. Am Ende des Aufbaues kann der Gasstrom auf zwei Ströme definiert geteilt werden. Der Volumenstrom eines der beiden Gasströme wird über ein Rotameter eingestellt und der zweite ergibt sich aus der Differenz (siehe Abbildung 26).

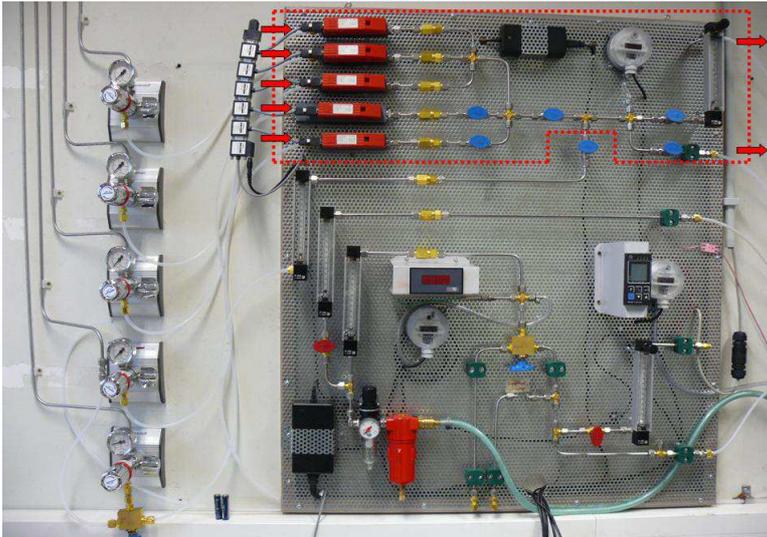


Abbildung 26: Mischeinheit und Splittereinheit für Verbrennungsgas

Die MFC der Firma Vögtlin vom Typ SMART werden über ein Softwareprogramm gesteuert und können sowohl einzeln wie auch gleichzeitig angesprochen werden.

Vor dem Rotameter wird mit einem Differenzdruckmessumformer der Firma Beck vom Typ 984M.3B3 der Differenzdruck zwischen Leitungsdruck und Umgebungsdruck von 0 bis 2,5 bar gemessen und am Display angezeigt.

5.3.3 Verteilereinheit für Luft

Der Luftstrang wird zu Beginn auf zwei unabhängige Leitungen definiert aufgeteilt: einerseits in einen Verbrennungsluftstrang und andererseits in einem Luftstrang zur Spülung des Reaktorfensters. Für beide Leitungen ist der Volumenfluss über ein Rotamter einstellbar. Am Ende des Verbrennungsluftstranges besteht die Möglichkeit, dass die Leitung auf zwei weitere Stränge aufgeteilt wird. Der Volumenstrom eines Luftstroms wird über ein Rotameter eingestellt und der zweite ergibt sich aus der Differenz (siehe Abbildung 27).

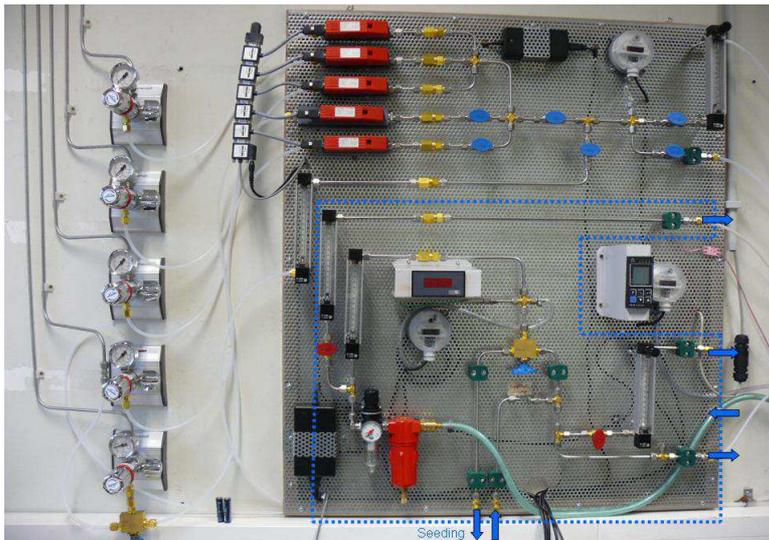


Abbildung 27: Luftverteilungseinheit für Spülluft und Verbrennungsluft

Die Luft wird der hauseigenen Druckluftleitung, welche mit ungefähr 8bar betrieben wird, entnommen. Da die Luft noch Verunreinigungen enthält, wird sie zuerst durch einen Ölfilter und Wasserabscheider geleitet. Der Wasserabscheider ist mit einem Druckminderer kombiniert, um Druckluft bei einem konstanten Arbeitsdruck zu gewährleisten.

In der Verbrennungsluftleitung werden der Druck sowie die Temperatur gemessen. Der Differenzdruckmessumformer der Firma Beck vom Typ 984M.3B3 misst den Differenzdruck zur Umgebung im Bereich von 0 und 2,5 bar. Die Temperatur wird mit einem Thermoelement Typ K Klasse 1, geeignet für Temperaturen bis 250 °C, gemessen.

Ein Zwei-Wege-Kugelhahn ermöglicht es, die Luft direkt in den Reaktor zu leiten oder zuerst in eine Seedingeinheit, welche den Luftstrom mit Öltröpfchen oder mit Titandioxidpartikel beladen kann. Diese Beladung der Luft wird für die Geschwindigkeitsmessung der Gasströmung benötigt.

5.3.4 Verteilereinheit für Zündgas

Aus Sicherheitsgründen wird der Flammenreaktor nicht mit dem Versuchsgasgemisch gezündet, sondern mit Propangas. Die Verteilereinheit für das Zündgas leitet das Propan in die Hauptleitung des Versuchsgasgemisches. Über ein Rotameter kann der Volumenfluss für das Zündgas eingestellt werden (siehe Abbildung 28).

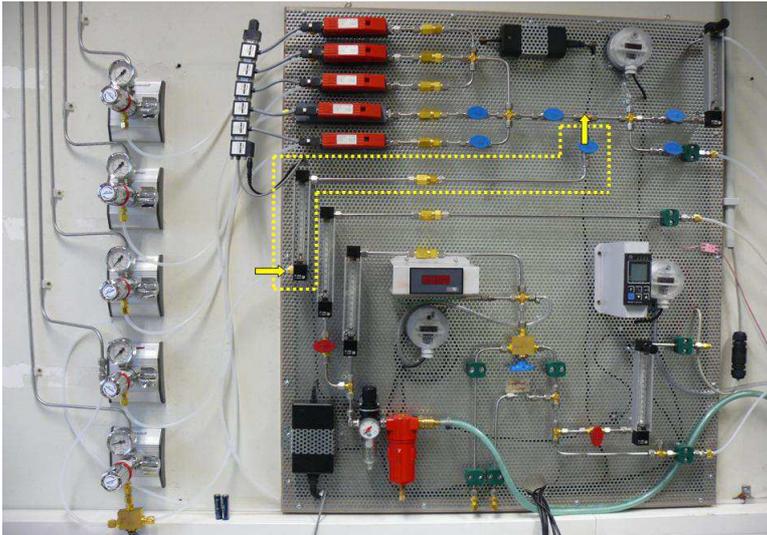


Abbildung 28: Verteilereinheit für Zündgas

Die Verteilereinheit wird über einen Teflonschlauch mit Propan gespeist. Die Propanflasche ist im Raum verankert. Eine Rückschlagsicherung schützt das System vor einem Flammenrückschlag und ein Einwegekugelhahn kann die Zündleitung von der Hauptleitung des Versuchsgasgemisches entkoppeln.

5.3.5 Displays für Reaktorüberwachung

Zur Reaktorüberwachung werden die Temperatur und der Druck in der Reaktorkammer gemessen und auf zwei Anzeigedisplays, welche auf der Gasverteilereinheit montiert sind, angezeigt (siehe Abbildung 29).

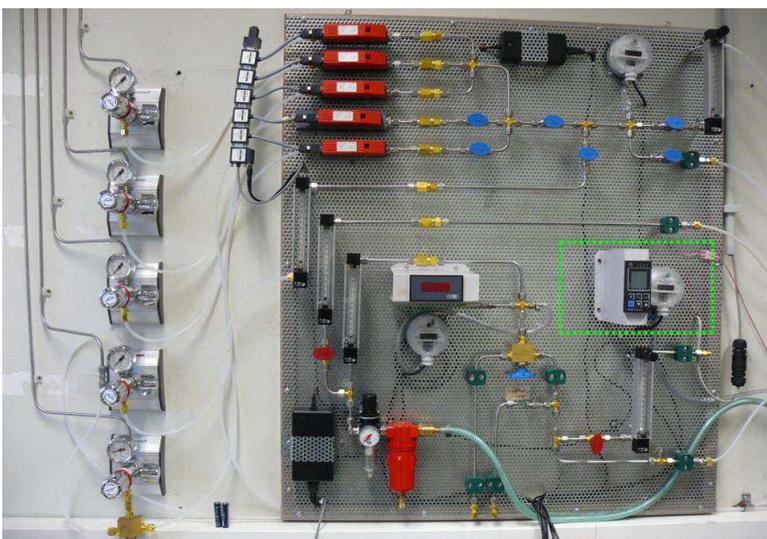


Abbildung 29: Display für Reaktorüberwachung

Die Temperatur wird mit einem Mantelthermoelement Typ N der Klasse 1 in der Reaktormittelachse 84 mm über dem Brennerkopf gemessen. Das Thermoelement ist für Temperaturen bis 1300 °C ausgelegt. Die Temperaturmessung ist Teil eines Sicherheitssystems, welches im Detail in Kapitel 0 beschrieben wird.

Der Unterdruck im Reaktor wird mit einem Differenzdruckmessumformer der Firma Beck vom Typ 984M.333 gemessen und am Gerät digital angezeigt. Der Messbereich des Gerätes liegt zwischen 0 und 500 Pascal. Da im Reaktor sehr hohe Temperaturen herrschen ist zum Schutz des Messinstruments zwischen Differenzdruckmessumformer und Messstelle im Reaktor eine Edelstahlspirale zur Kühlung zwischengeschaltet.

5.4 Flammenreaktor

Der Flammenreaktor besteht aus einem zylindrischen Reaktormantel aus Edelstahl mit einer mehrteiligen Reaktordämmung im Inneren aus feuerfester Keramikfaser. Ein höhenverstellbares Fenster, welches im Reaktorstutzen geführt ist, ermöglicht den optischen Zugang auf verschiedenen Höhen zum Reaktorinnenraum. An dem Reaktormantel sind neun verschließbare Öffnungen in verschiedenen Höhen zur Entnahme einer Gasprobe angebracht. Über eine Verteilereinheit an der Unterseite des Reaktors wird das Versuchsgas und Luft in den Reaktorinnenraum eingebracht (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31).



Abbildung 30: Flammenreaktor Fotoansicht

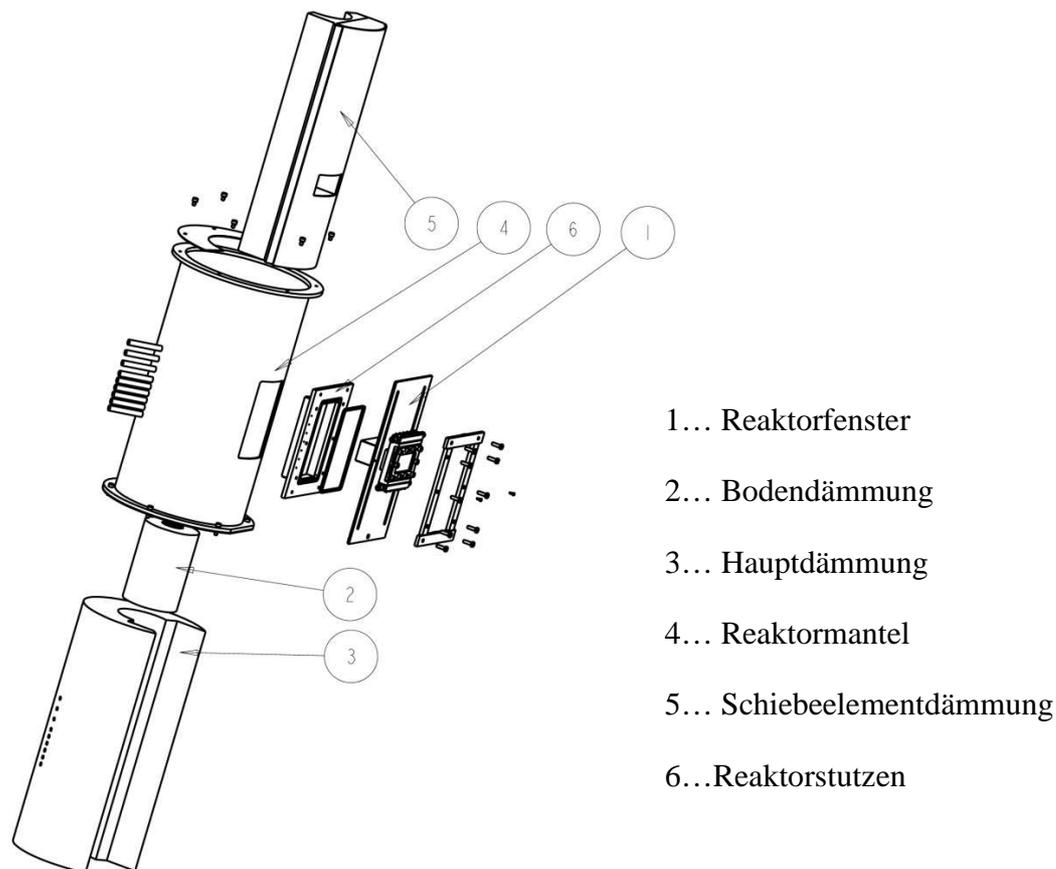


Abbildung 31: Flammenreaktor Explosionszeichnung

Alle außen liegenden Reaktorteile sind über feuerfeste Dichtungen gasdicht miteinander verbunden. Der Flammenreaktor ist auf ein fahrbares Gerüst geschraubt. Dies ermöglicht einerseits Mobilität und andererseits erleichtert es den optischen Zugang in Augenhöhe.

Die Zündung der Flamme erfolgt entweder elektrisch oder mittels eines modifizierten, handelsüblichen Feuerzeugs über eine der Probenahmeöffnungen.

5.4.1 Reaktormantel

Der zylindrische Außendurchmesser des Reaktormantels beträgt 355,6 mm, die Höhe 670 mm und seine Wandstärke ungefähr 4mm. Als Werkstoff wurde 1.4541 Edelstahl (DIN X6CrNiTi1810) verwendet, welcher ohne Schwierigkeiten schweißbar ist und eine ausreichende Warmfestigkeit bis 850 °C aufweist [20].

Der Reaktormantel hat einerseits die Funktion als Sicherheitsmantel, andererseits als mechanische Aufnahme für den Reaktorstützen sowie die Probenahmestutzen. Um die Gasdichtheit zu gewährleisten, wurde der Mantel mit allen Stutzen verschweißt. Der Mantel selbst ist auf eine Stahlplatte geschraubt und mittels einer Graphitdichtung gedichtet.

5.4.2 Reaktordämmung

Die Reaktordämmung besteht aus drei unterschiedlichen Bauteilen (siehe Abbildung 31), die aus zwei unterschiedlichen vakuumgeformten Keramikfasern gefertigt sind. Für Hauptdämmung für den Reaktormantel und für das Schiebeelement wurde KVS 154 und für die Dämmung für den Boden KVS 174 als Material verwendet. Beide Materialien sehr porös. KVS 154 besitzt 1400 °C Daueranwendungstemperatur und eine Biegefestigkeit von 0,6 MPa. Der Dämmungsboden weist eine Daueranwendungstemperatur von 1700 °C und eine Biegefestigkeit von 1,1 MPa auf. Dieses Material wurde nicht wegen der höheren Temperaturfestigkeit, sondern vielmehr aufgrund der höheren Materialfestigkeit, gewählt. Diese ermöglichte die Fertigung für dieses Bauteil mit den nötigen knappen Bohrungsabständen.

Die Hauptdämmung und die Schiebeelementdämmung haben eine Wandstärke von 96mm und die Bodendämmung eine Materialstärke von 226mm. Diese Abmessungen führen zu einem zylindrischen Brennkammerraum mit 150mm Durchmesser und einer Höhe von 468mm.

Die Hauptdämmung steht im Reaktormantel auf der Bodenplatte und wird durch die eigene Schwerkraft in Position gehalten. Die Schiebeelementdämmung ist in eine Aufnahmekonstruktion aus Blech gefasst, um die Kräfte bei der Verschiebung besser aufnehmen zu können, da das Material selbst zu porös ist. Auf die Funktionsweise der Schiebeelementdämmung und Zusammenspiel mit dem Fensterschiebeelement wird im nachfolgenden Kapitel 5.4.3 eingegangen.

In seiner Herstellungsform ist der Keramikfaser-Werkstoff ein weißes Material. Bei stark rußenden Flammen wird das Material mit einer Rußschicht überzogen (siehe Abbildung 32 und Abbildung 33). Diese Rußschicht kann mittels einer überstöchiometrischen Flamme wieder verbrannt werden und das Material nimmt seine ursprünglich weiße Farbe an.

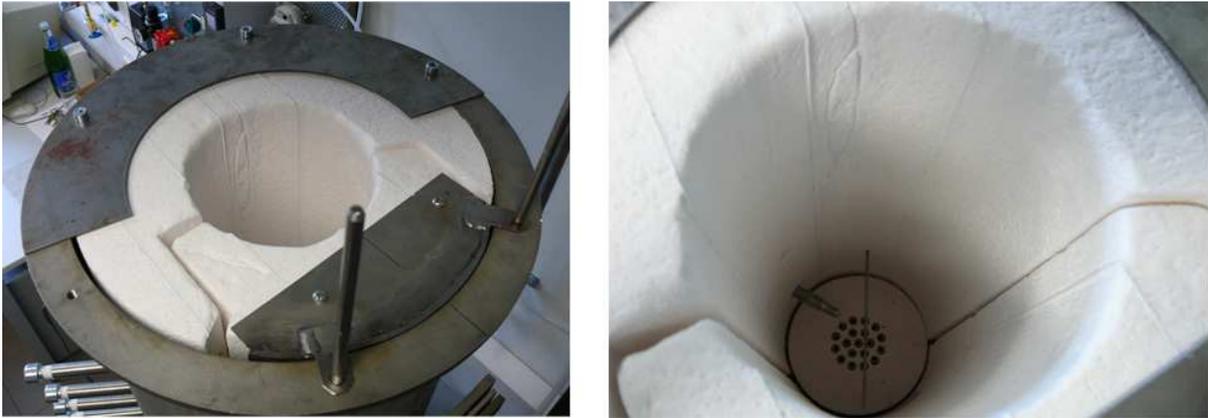


Abbildung 32: Keramikfaserdämmung vor erstem Feuertest



Abbildung 33: Keramikfaserdämmung nach erstem Feuertest

In der Bodendämmschicht befinden sich 19 Bohrungen mit jeweils 9 mm Durchmesser. Durch diese Bohrungen führen 19 Edelstahlrohre, welche Teil des Gas- und Luftverteilers sind (siehe Kapitel 5.4.4). In der Hauptdämmung sind 9 Bohrungen mit 10 mm Durchmesser angebracht, eine mit 14 mm und eine mit 24 mm Durchmesser. Diese Öffnungen dienen zur Probenahme, Temperaturmessung und Druckmessung. In der Schiebeelementdämmung ist eine rechteckige Öffnung mit 115 mm mal 60 mm für den optischen Zugang ausgenommen.

Unabhängig von der erzeugten Flamme und deren Betriebsdauer zeigt der Reaktormantel außen eine durchschnittliche Oberflächentemperatur von 50 °C. Lediglich an den Schweißnähten der Probenahmestutzen und des Reaktorstutzens treten Temperaturen um 70 °C auf.

5.4.3 Reaktorfenster

Das Reaktorfenster dient einerseits zur Überwachung und Beobachtung der Flamme durch das menschliche Auge und andererseits stellt es einen Zugang für optische Messverfahren, wie das LDA-Verfahren, dar. Das Fenster besitzt eine Spülvorrichtung mit Luft. Diese hat den

Zweck eine Beschlagung der Innenseite der Fensterscheibe durch Titandioxidpartikel, welche für Flammenmessungen mit dem LDA System notwendig sind, zu verhindern. Wenn sehr hohe Temperaturen im Reaktor auftreten, kann die Luftspülung auch für die Kühlung des Fensters benutzt werden und es ist nicht notwendig, eine teure, höher temperaturbeständige Glasscheibe aus Quarz- oder Saphierglas zu verwenden.

Eine Rahmenbedingung bei der Auslegung des Fensters war, dass die Flamme über eine Höhe von 200 mm beobachtet werden kann. Da jedoch ein großes Fenster im Widerspruch zum Auslegungsparameter der maximalen Dämmung steht (siehe Kapitel 5.1), wurde ein kleines über die Höhe verschiebbares Fenster konstruiert. Um die Breite des Fensters zu minimieren, wurde das Fenster seitlich aus der Achsenmitte versetzt konstruiert. Dies begründet sich mit der Annahme, dass Reaktorströmung im Kern annähernd rotationssymmetrisch ist und damit bei optischen Messverfahren nicht über die gesamte Breite vermessen werden muss. Aufgrund dieser Überlegungen und der Konstruktionsausführung ergibt sich ein optischer Zugang mit 109 mm Breite und 54 mm Höhe, welcher über die Höhe mittels eines Spindelmechanismus verschiebbar ist.

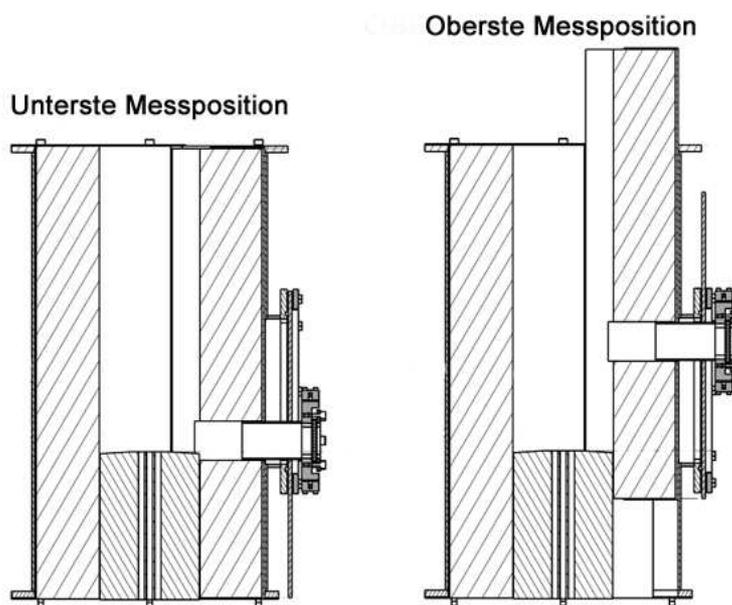


Abbildung 34: Reaktorfenster Verschiebepositionen

Bei Verschieben des Fensterteils wird das Dämmungsschiebelement mitverschoben. Diese Konstruktionsweise hat zwei Vorteile. Einerseits ist eine ständige Dämmung des Feuerraums gewährleistet und andererseits benötigt diese Konstruktionsweise nur eine kleine Öffnung in der Dämmung für den optischen Zugang.

Die Gleitfläche, welche sich aufgrund der Verschiebung zwischen Reaktorstützen und Fensterschiebeelement ergibt, stellt für die Dichtung eine besondere Herausforderung dar. Auf der Dichtfläche des Reaktorstützens ist eine Nut mit 5 mm Breite und 3 mm Tiefe gefräst. In dieser befindet sich eine Ofendichtschnur mit 8 mm Durchmesser, welche mit einem bis 1110 °C temperaturfesten Kleber eingeklebt ist. Auf dieser so gestalteten Dichtfläche wird die plane Fläche des Fensterschiebelements über eine Klemmvorrichtung gepresst (siehe Abbildung 35). Je nachdem, ob das Fensterschiebelement vorschoben wird oder statisch in Position gehalten wird, muss die Klemmvorrichtung gelöst oder stufenlos die Vorspannung angepasst werden.

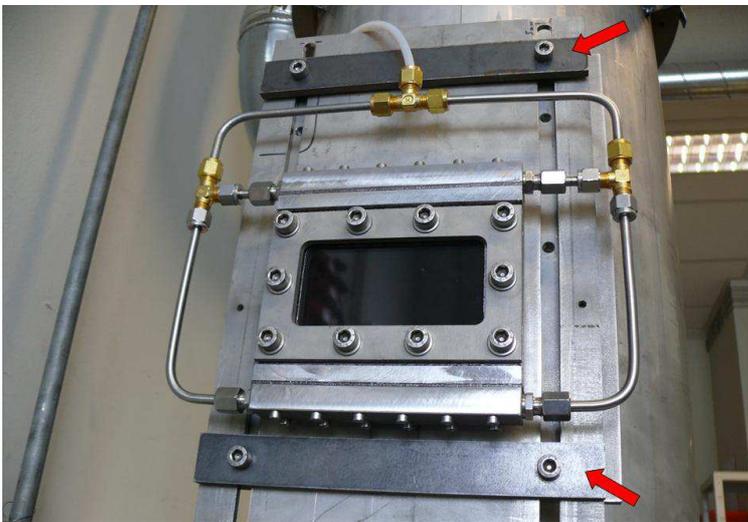


Abbildung 35: Fensterschiebelement Klemmung

Als Scheibe für das Sichtfenster wird ein Standard Ofenglas mit 5 mm Dicke verwendet, das auf eine maximale Betriebstemperatur von 750 °C ausgelegt ist [21] und ausreichend durchsichtig ist, um optische Messverfahren nicht zu beeinflussen.

Beim Einsetzen des optischen LDA-Messverfahrens muss die zu vermessende kalte Gasströmung mit Öltröpfen bzw. die heiße Gasströmung mit Titandioxidpartikel beladen werden. Speziell die Titandioxidpartikel sind bereits bei Umgebungszustand sehr kohäsiv und kleben im warmen Zustand sehr leicht an Oberflächen. Um das Verkleben der Scheibe zu verhindern und somit den optischen Zugang für das LDA-Messgerät frei zu halten, wurde eine Fenster-spülung angedacht.

Ein großer Spülluftstrom wirkt dem Verkleben positiv entgegen, jedoch beeinflusst dieser negativ das Strömungsprofil im Messbereich. Deshalb wurden im Vorfeld der Konstruktion verschiedene Konzeptvarianten am Computer simuliert.

Abbildung 36 zeigt vier mögliche Varianten. Bei Varianten 1 bis 3 beträgt das Verhältnis von Spülluft zu Verbrennungsluft 5 % und die Anströmgeschwindigkeit aus einem Loch immer 1m/s. Variiert wurden die Lochanzahl bzw. die Spülluftmengen von oben bzw. von oben und unten an der Scheibe. Die Strömungsgeschwindigkeit bei Variante 4 beträgt 20 m/s und das Verhältnis von Spülluft zu Verbrennungsluft 100 %. Damit diese große Spülluftmenge keine Falschlufteffekte in der Messströmung erzeugt, wird diese auf der Fensterunterseite abgesaugt.

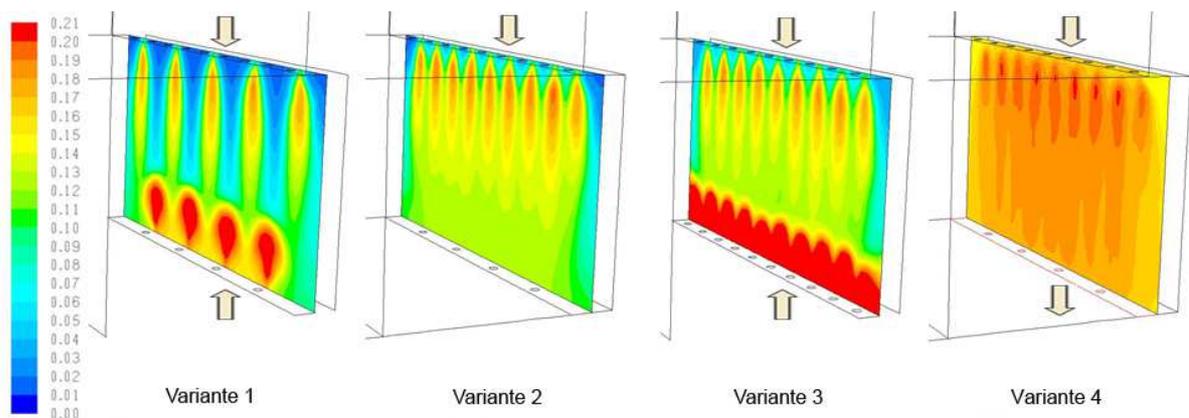


Abbildung 36: O₂ Konzentration [mol/mol] für verschiedene Spülluftkonzepte

Erläuterungen: CFD-Simulationen durchgeführt von Dipl. Ing. Dr. Selma Zahirovic (Bioenergy 2020+ GmbH)

Das beste Ergebnis bezüglich des Strömungsprofils liefert Variante 4, jedoch ist diese konstruktiv, aufgrund der benötigten Absaugung an der Fensterunterseite, im Rahmen dieser Arbeit nicht umzusetzen. Variante 2 bietet das beste Ergebnis mit realisierbaren Konstruktionsvorgaben, diese Variante wurde für die in dieser Arbeit beschriebenen Versuche gewählt.

Konstruktiv wurden 10 Düsen mit je 2 mm Durchmesser in einem Abstand von 10mm an der Oberseite und an der Unterseite umgesetzt (siehe Abbildung 37). Die Spülung von der Oberseite oder der Unterseite kann separat oder gemeinsam aktiviert werden. Jede Düse hat ungefähr einen 3mm Abstand von der Fensterscheibeninnenseite, abhängig von der Pressung der Dichtung zwischen Fensterglas und Fensterflansch. Dieser geringe Abstand war eine konstruktive und fertigungstechnische Herausforderung, jedoch sehr wichtig, da ein minimaler Abstand zur Glasscheibe eine bessere Spülwirkung erzielt.

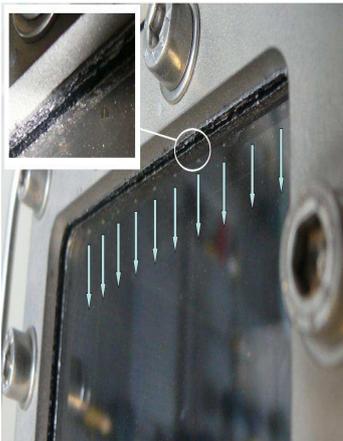


Abbildung 37: Detailansicht der Fensterspülung

Der Einfluss der Spülluft auf die Versuchsgasströmung und die Qualität der Spülung hängen auch mit von der Höhenposition des Fensters ab. Je höher sich die Position des Fensters befindet, desto schlechter wird die Qualität der Spülung und umso größer wird der negative Einfluss der Spülluft auf die Versuchsgasströmung. Man erkennt, dass die O_2 Konzentration des Spülluftstroms in der Fensterebene auf der mittleren Messhöhe im Vergleich zur Spülung in der untersten Messhöhe abnimmt. Dies deutet auf eine erhöhte Vermischung mit dem Gasstrom aus dem Reaktor direkt an der Fensterscheibe hin (siehe Abbildung 38 und Abbildung 39). Die Abbildungen stammen aus CFD-Simulationen mit einem Verhältnis von Spülluft zu Verbrennungsluft von 6 % und einer Austrittsgeschwindigkeit aus den Spüldüsen an der Fensteroberseite von 1 m/s.

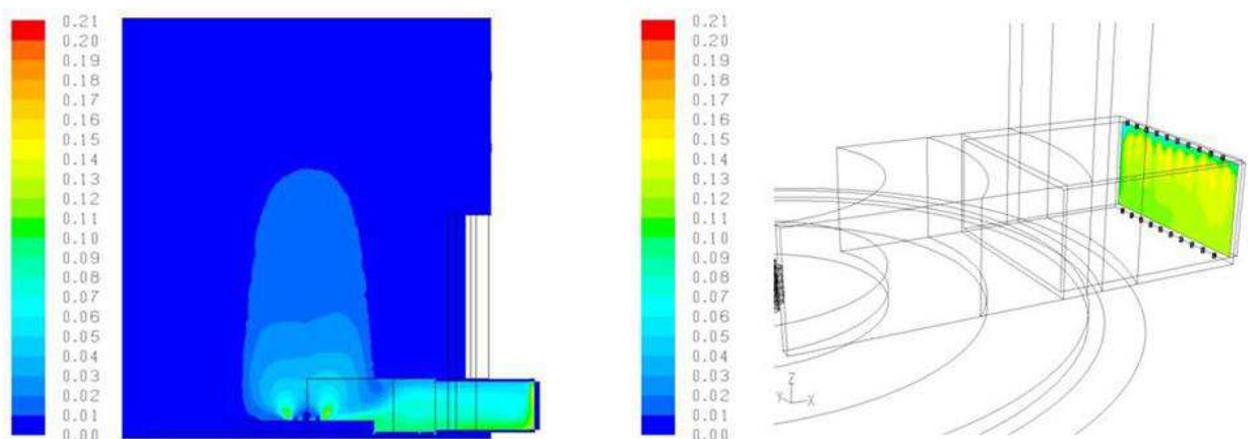


Abbildung 38: O_2 Konzentration [mol/mol] bei Fensterspülung in unterster Messhöhe

Erläuterungen: CFD-Simulationen durchgeführt von Dipl. Ing. Dr. Selma Zahirovic (Bioenergy 2020+ GmbH)

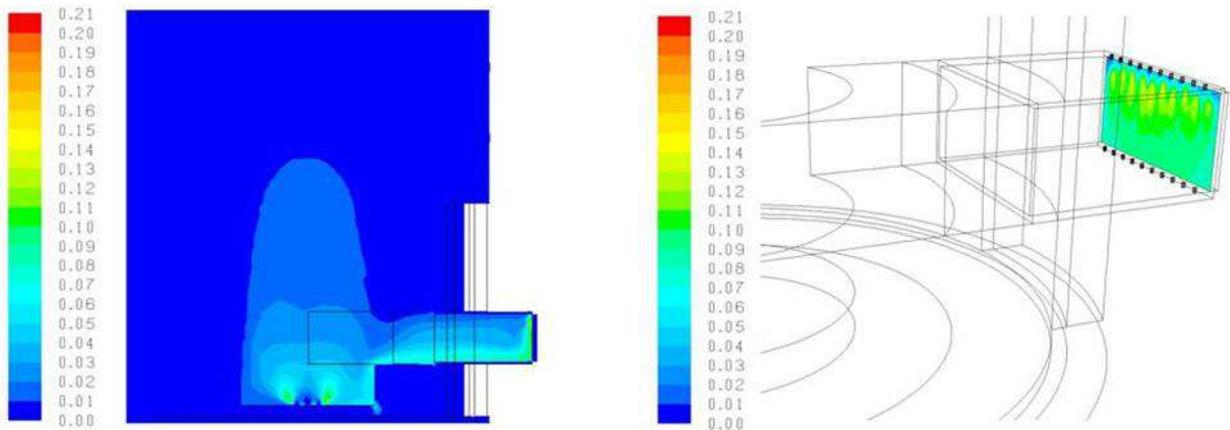


Abbildung 39: O₂ Konzentration [mol/mol] bei Fensterspülung in mittlerer Messhöhe
Erläuterungen: CFD-Simulationen durchgeführt von Dipl. Ing. Dr. Selma Zahirovic (Bioenergy 2020+ GmbH)

5.4.4 Gas- und Luftverteiler

Der Gas- und Luftverteiler hat die Aufgabe das Versuchsgas und die Luft für die Verbrennung an definierten Positionen über maximal 19 Eintrittsöffnungen in den Reaktorraum einzubringen. Er befindet sich an der Unterseite des Reaktors und kann von drei unterschiedlichen Gasleitungen gespeist werden (siehe Abbildung 40). Der Verteiler ist konstruiert, um an jeder Austrittsöffnung für das Gas eine definierte Gasgeschwindigkeit vorzugeben.

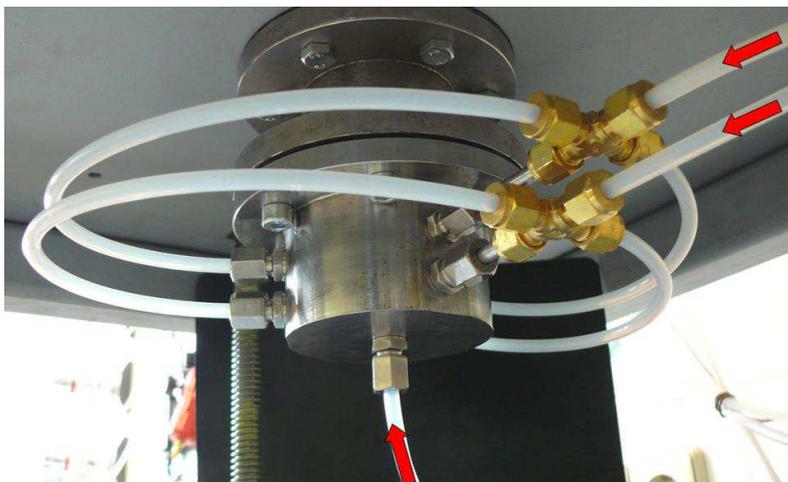


Abbildung 40: Gas- Luftverteiler Fotoansicht

Der Gas- und Luftverteiler besteht grundsätzlich aus einem Kammerteil (zwei Ringkammern und einer zylindrischen Kammer), einer Blende, einem Flansch und 19 in Kreisen angeordneten Edelstahlrohren mit je 5 mm Rohrrinnendurchmesser. Die Kammern beaufschlagen bestimmte Rohrgruppen mit Versuchsgas beziehungsweise mit Luft. Im Zentrum befindet

sich ein Rohr, auf dem Lochkreisdurchmesser von 50 mm befinden sich 6 Rohre und auf dem Lochkreisdurchmesser von 100 mm sind 12 Rohre verbaut. Alle Rohre auf den Lochkreisdurchmessern sind in symmetrischen Abständen angeordnet (siehe Abbildung 41).

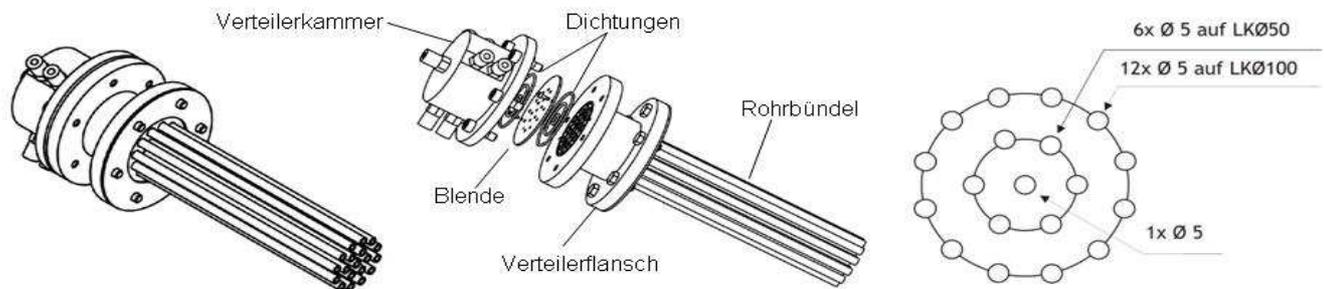


Abbildung 41: Gas- Luftverteiler 3D Ansicht

Die zentrale Kammer ist zylindrisch und beaufschlagt nur das zentrale Rohr mit Gas. Die mittlere Kammer ist ringförmig und versorgt maximal 6 Rohre mit Gas. Die äußere Kammer ist auch ringförmig und versorgt bis zu 12 Rohre mit Gas. Alle Kammern sind voneinander mittels O-Ring Dichtungen getrennt (siehe Abbildung 42). Jede Kammer kann nun wahlweise mit Luft oder mit Versuchsgas beaufschlagt werden. Den ringförmigen Kammern wird das Gas aus Symmetriegründen der Strömungsführung an drei gegenüberliegenden Positionen, welche mit einem Winkel von 120 Grad zueinander angeordnet sind, zugeführt (siehe Abbildung 40). Über den in die Kammern eingeregelter Volumenstrom ergibt sich eine definierte Austrittsgeschwindigkeit aus den Verteilerrohren.



Abbildung 42: Gas- Luftverteiler Kammernansicht

Alle Rohre sind mittels einer Blende von der Verteilerkammer getrennt. Über die Wahl der Blende können unterschiedlichste Gas- und Luftaufgabemöglichkeiten realisiert werden. Als Blende fungiert ein Blech mit genau positionierten Bohrungen mit je 2mm Durchmesser. Die Bohrungen sind jeweils über der Achse eines Verteilerrohres angebracht. Befindet sich nun eine Bohrung über einem Verteilerrohr, so wird dieses mit Gas beaufschlagt, andernfalls nicht. Um die präzise Verteilung zu gewährleisten, ist es ratsam, die nicht zu beaufschlagenden Rohre zusätzlich mit Kunststoffstopfen auf der Verteilerflanschseite zu versehen.

Eine weitere Funktion der Blende ist die Homogenisierung des Drucks. Bevor das Gas und die Luft in die Verteilerkammer eintreten, herrschen in den zugeführten Leitungen unterschiedliche Drücke aufgrund verschiedener Rohrlängen und Armaturen.

Abbildung 43 zeigt einige sinnvolle Verteilungsvarianten mit einer Blende, welche das Strömen von Verbrennungsgas und Luft jeweils auf allen Verteilerkreisen sowie im Zentrum ermöglicht. Bei der Variante im dritten Bild von links wird die gleiche Blende verwendet, jedoch wird der äußere Verteilerring mittels der MFC weder mit Luft noch mit dem Verbrennungsgas beaufschlagt.

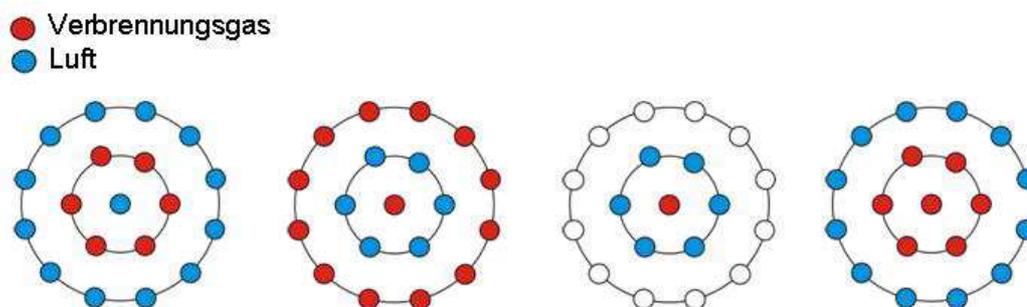


Abbildung 43: Gas- und Luftverteilungsvarianten ohne Blendenvariation

Die Länge der Rohre ergibt sich aus einer Berechnung der hydraulischen Einlauflänge. Dies ist jene Strecke, die eine Strömung benötigt, um ein voll ausgebildetes Strömungsprofil, das sich nicht mehr ändert, aufzuweisen. Als Berechnungsgrundlage dient Formel 6 um die notwendige Länge der Verteilerrohre abzuschätzen.

$$L_e = 0,05 \cdot D_H \cdot Re_D$$

Formel 6: hydraulische Einlauflänge

Erläuterung: L_e ... hydraulische Einlauflänge [m], Faktor 0,05... empirisch bestimmt, D_H ...hydraulischer Durchmesser [m], Re_D ...Reynoldszahl bezogen den hydraulischen Durchmesser [-], Quelle [22]

Der hydraulische Durchmesser ist in diesem Fall der Rohrinne Durchmesser der Rohre. Die Reynoldszahl wird nach Formel 1 berechnet. Für die Auswahl der kinematischen Viskosität dienen die Werte aus Tabelle 4.

Tabelle 4: kinematische Viskosität des Versuchsgases und der Luft

Erläuterung: Quelle [23]

Gas	[vol%]	ν [mm ² /s] bei 0°C und 1bar
CO	18	13,3
N ₂	60	15,3
CO ₂	12	7,0
H ₂	8	94,1
CH ₄	2	14,3
Gemisch	100	20,2
Luft	100	13,5

Zur Berechnung der notwendigen Einlauflänge wird jener Zustand verwendet, welcher zur maximalen Einlauflänge führt. Für den Versuchsstand beträgt die maximale geplante Austrittsgeschwindigkeit 3 m/s, die kinematische Viskosität für Luft $1,35 \times 10^{-5}$ m²/s und als geometrische Größe wird der Verteilerrohrinnendurchmesser von 5mm verwendet. Dies führt zu einer berechneten Einlauflänge von 278 mm. Konstruktiv wurden Rohe mit einer Länge von 300 mm verwendet.

5.4.5 Reaktormessöffnungen

Am Reaktor befinden sich zwei Messöffnungen zur Reaktorbetriebskontrolle und andererseits neun Messöffnungen, welche für die Strömungs- bzw. Flammendiagnostik verwendet werden können. Alle Messöffnungen sind als zylindrische Stutzen ausgeführt und am Reaktormantel angeschweißt. Die Mittelachse jedes Stutzens ist auf die Mittelachse des Reaktormantels ausgerichtet.



Abbildung 44: Überwachungsstutzen und Probenahmestutzen

Im Dauerbetrieb werden zwei Messöffnungen benutzt, über welche Druck und Temperatur im Reaktorraum gemessen werden. Ein Thermoelement wird mittels eines Teflon-Klemmrings gasdicht im Messstutzen fixiert. Das elektrische Signal des Thermoelements wird über eine elektrische Leitung zu einer Anzeigeeinheit übertragen. Für die Druckmessung wird eine Kühlwendel benötigt, welche über einen Klemmring am Messstutzen befestigt ist. Am Ende der Kühlwendel ist ein Kunststoffschlauch angeschlossen, welcher mit einem Differenzdruckmessumformer inklusive Anzeigeeinheit verbunden ist. Beide Einheiten dienen zur Überwachung des Reaktors (siehe Abbildung 44).

Weiteres sind neun Probenahmestutzen mit einem Innendurchmesser von 14 mm am Reaktormantel angeschweißt. Die Achse des untersten Stutzens befindet sich 15 mm über dem Brennerkopf. Die fünf darüber angeordneten Stutzen sind immer im gleichen Achsenabstand von 20 mm angeordnet. Die nächsten zwei Stutzen haben einen Achsenabstand von 30mm und der am höchsten angeordnete Probenahmestutzen ist 40 mm über dem darunterliegenden angeordnet. Jeder Stutzen kann über eine M16 Inbusschraube mit Teflonband umwickeltem Gewinde gasdicht verschlossen werden (siehe Abbildung 44). Sie dienen in erster Linie zur Gasprobenentnahme mittels einer Probenahmelanze, welche mit Hilfe eines Klemmrings gasdicht auf dem Außendurchmesser des Probenahmestutzens befestigt wird. Es stehen drei verschieden dünne Probenahmelanzen mit den Innendurchmessern an der Spitze von 1 mm, 2mm und 5mm zur Verfügung (siehe Abbildung 45). Je dünner die Probenahmelanze ist, desto geringer ist die Beeinflussung der Strömung bei den Probenahmen. Für die Messungen wurde die mittlere Probenahmelanze verwendet, da die dünnste Ausführungsvariante für die Pumpe der Probenahme einen zu großen Druckverlust erzeugt.



Abbildung 45: Probenahmelanzen

Die Zündung des Verbrennungsgas-Luft-Gemisches im Reaktor erfolgt ebenfalls über einen Probenahmestutzen. Am untersten Stutzen kann eine Zündeinheit eingeführt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Zündeinheit befindet sich im nachfolgenden Kapitel 5.4.6.

5.4.6 Zündung der Flamme

Für die Zündung des Verbrennungsgasgemisches in der Reaktorkammer stehen zwei unabhängige Systeme zur Verfügung, ein elektrisches System mit kontinuierlich pulsierenden Zündfunken und ein händisches System mit Flammenzündung. In beiden Fällen erfolgt das Einführen der Zündeinheit in die Reaktorkammer über den untersten Probenahmestutzen. Dann erfolgt die Aktivierung der Zündeinheit und nachfolgend wird das Zündgas Propan und Luft der Reaktorkammer zugeführt. Die Reihenfolge ist aus Sicherheitsgründen sehr wichtig, da die Zündung sofort über dem Brennerkopf erfolgen soll, damit sich nur ein geringes Volumen an zündfähigem Gemisch vor der Zündung bilden kann. Wenn die Flamme in der Reaktorkammer brennt, wird die Zündeinheit entfernt und der Probenahmestutzen verschlossen.

Da aufgrund des Innendurchmessers des Probenahmestutzens nur begrenzt Platz vorhanden ist, wird eine kompakte Bauweise der elektrischen Zündeinheit benötigt. Handelsübliche Zündeinheiten haben eine zu breite oder dicke Bauweise, dünnere Systeme verwenden zur Rückleitung des Zündstromes die Metallteile eines Brennerkopfs als Masse. Der Abstand der eingeführten Zündeinheit zu den Rohren des Gas- und Luftverteilers ist im gegebenen Fall zu groß, die resultierende Funkenstrecke wäre zu lange, um mit der in handelsüblichen Zündgeräten generierten Hochspannung einen Funken erzeugen zu können. Deshalb musste eine neue Lösung konzipiert und umgesetzt werden (siehe Abbildung 46).



Abbildung 46: Gesamtansicht der elektrischen Zündeinheit

Die Zündeinheit wird mit 230 Volt über eine Steckdose betrieben. Der Zündtrafo erzeugt periodische Hochspannungsimpulse von ungefähr 5 Kilovolt. Der Zündstab wird über den Probenahmestutzen eingeführt und über einen außen liegenden Klemmring fixiert. An der Spitze des Zündstabes wird ein ungefähr 3mm langer kontinuierlich pulsierender Zündfunke aufgebaut. Als Zündelektrode dient eine Wolframelektrode, die zur Isolation gegen Masse von einem Glasrohr ummantelt ist. Das Glasrohr ist mit feuerfestem Keramikkleber in ein 300 mm langes Edelstahlrohr eingeklebt. Das Edelstahlrohr besitzt einen Außendurchmesser von 16 mm mit 1 mm Wandstärke und ermöglicht, an Masse angeschlossen, die Rückleitung des Zündstroms. Die Gegenelektrode wird von einem auf das Edelstahlrohr aufgeschweißten Drahtaken gebildet (siehe Abbildung 47).

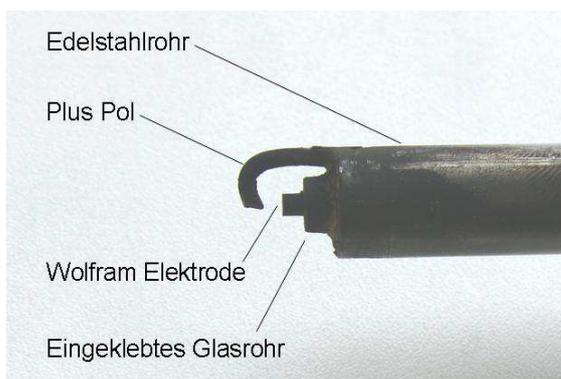


Abbildung 47: Detailansicht der elektrischen Zündeinheit

Für die Zündung des Brennstoffgemisches im Reaktor mittels der elektrischen Zündung ist nur eine Person nötig. Die Zündeinheit wird positioniert und danach aktiviert. Über das Sichtfenster kann der Zündfunke mit freiem Auge kontrolliert werden. Nun lässt die Person unter ständiger Sichtkontrolle des Zündfunkens das Brenngas und die Luft in den Reaktorraum einströmen, bis das Brennstoffgemisch gezündet wird.

Das händische Zündsystem ist ein adaptiertes verlängertes Feuerzeug und wurde von Dipl. Ing. Thomas Schuster angefertigt. Es dient als Reserve-Zündeinheit falls die elektrische Zündung ausfallen sollte. Ein handelsübliches Grillanzündeferzeug wurde soweit verlängert, damit es durch den Probenahmestutzen bis zum Brennerkopf in der Reaktorkammer reicht (siehe Abbildung 48).



Abbildung 48: Gesamtansicht der händischen Zündeinheit

Für die Zündung des Gasgemisches im Reaktor mit dem adaptieren verlängerten Feuerzeug sind immer zwei Personen nötig. Da die Probenahmestutzen gegenüber dem Sichtfenster angeordnet sind, kann derjenige, der die Zündeinheit bedient, nicht in den Reaktorraum einsehen und überprüfen, ob die Flamme des Feuerzeugs brennt oder nicht. Somit ist immer eine zweite Person nötig, welche über das Sichtfenster die Flamme des Feuerzeuges kontrolliert und erst dann das Brenngas und die Luft in die Brennkammer einströmen lässt.

5.5 Abgas-Absaugungssystem

Das Abgas-Absaugungssystem ist für zwei Aufgaben ausgelegt. Einerseits soll es einen konstanten Unterdruck im Reaktorraum erzeugen und andererseits bläst es unverbranntes Gas bzw. das Abgas des Verbrennungsprozesses über ein Rohrsystem in die Umgebung aus.

An der Oberseite des Reaktormantels ist eine Absaugglocke aufgesetzt. Eine feuerfeste Keramikpapierdichtung dichtet beide Komponenten zueinander, welche mittels Metallschnallen aufeinandergepresst werden. Am höchsten Punkt der Absaughaube befinden sich 18 Bohrungen mit einem Lochdurchmesser von 11,5mm, über welche Falschlufte in das System eingesaugt wird. Die Falschlufte dient der Verdünnung des heißen Abgases, um die Temperatur im verdünnten Abgasstrom soweit zu senken, damit keine Schädigung der Anlagenkomponenten eintritt (siehe Abbildung 49).

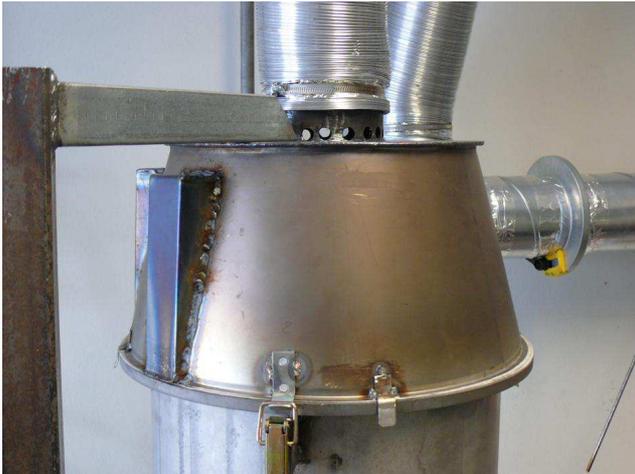


Abbildung 49: Absaughaube

Über einen SpiroFlex-Schlauch und Spiro-Rohre wird das Abgas in die hauseigene Abluftanlage gesaugt. Zusätzlich befinden sich dazwischen noch eine Iris-Blende und ein Saunaventilator. Beide Elemente dienen der Unterdruckregelung im Reaktor. Der Ventilator fungiert als zusätzliches Sicherheitssystem (Details siehe Kapitel 5.6.3). Die Absaugstärke der hauseigenen Absaugung lässt sich stufenlos mit einer Genauigkeit im einstelligen Pascalbereich verstellen. Der Saunaventilator kann nur ein- oder ausgeschaltet werden. Über eine Irisblende, welche zwischen Saunaventilator bzw. der hauseigenen Absaugung und Absaugglocke angeordnet ist, lässt sich der Rohrquerschnitt stufenlos von 100 % freien Querschnitt auf ungefähr 30 % freien Querschnitt reduzieren. Dies wirkt sich auf den Druckverlust der Absaugung aus und kann als zusätzliche Unterdruckregelung im Reaktor verwendet werden. Eine offene Blende bedeutet einen größeren Unterdruck und eine geschlossene einen kleineren Unterdruck im Reaktor. Weiteres befindet sich eine Falschlufteleitung in der hauseigenen Absaugung nach dem Saunaventilator. Diese ist mit einer Drosselklappe versehen, welche bei Öffnung der Klappe Falschlufteleitung aus dem Raum zieht. Damit kann wiederum der Unterdruck im Reaktor stufenlos mit einer Genauigkeit im einstelligen Pascalbereich geregelt werden. Eine offene Klappe bedeutet einen kleineren Unterdruck und eine geschlossene Klappe einen großen Unterdruck in der Reaktorkammer. Im Praxisbetrieb wird der hausinterne Ventilator bei fast maximaler Leistung verwendet, die Irisblende ist bei vollem Querschnitt geöffnet und über die Drosselklappe wird der Unterdruck im Reaktor eingestellt. Dies hat den Zweck, dass die Falschlufteleitung im System immer den maximalen Luftvolumenstrom aus dem Versuchsraum absaugt und somit maximale Sicherheit bei etwaigen Gasaustritten gewährleistet wird. Tabelle 5 zeigt die maximal möglichen Regelungsgrenzen, abhängig von den verwendeten Absaugsystemen, welche einzeln oder gemeinsam betrieben werden können für die Unter-

druckerzeugung im Reaktor. Die Unterdruckwerte wurden im Reaktor gemessen, ohne dass eine Gaszuströmung in den Reaktor erfolgte. Ein Gasaufgabestrom würde die maximal möglichen Unterdrücke im einstelligen Pascalbereich verkleinern.

Tabelle 5: maximale Unterdruckgrenzen im Reaktor

Gerät	Unterdruck im Reaktor		Regelung
	p_{\min} [Pa]	p_{\max} [Pa]	
Hausventilator	1	66	Drehzahlregelung Ventilator, Klappe, Irisblende
Saunaventilator	80	166	Klappe, Irisblende
Haus- und Saunaventilator	80	220	Drehzahlregelung Ventilator, Klappe, Irisblende

Bei Versuchen mit langsamer Strömungsgeschwindigkeit des Versuchsgases hat sich gezeigt, dass sich ein Unterdruck von über 100 Pa negativ auf die Strömungsstabilität im Messbereich der Strömung auswirkt. Deshalb wurde für die in dieser Diplomarbeit betrachteten Versuchsreihen nur das hauseigene Absaugsystem verwendet.

5.6 Sicherheitssysteme

Bei diesem Versuchsaufbau wurden hochentzündliche Gase wie Wasserstoff (H_2) und Methan (CH_4) sowie das unter anderem hochgiftige Gas Kohlenmonoxid (CO) eingesetzt.

Kohlenmonoxid-Gas wird als hochentzündlich und hochgiftig eingestuft. Neben der Entzündlichkeit ist die Giftigkeit der ausschlaggebende Faktor für die Gefährlichkeit des Gases. Es ist geruchlos und führt bei Einatmen zur Bewusstlosigkeit, gefolgt vom Atemstillstand und schlussendlich zum Tod. Im Mittel gelten Belastungen von mehr als 100 ppm als gesundheitsgefährdend. Als maximal zulässige Arbeitsplatz Konzentration (MAK) gelten 30 ppm [24, 25]. Um die Giftigkeit mit handgreiflichen Größen zu beschreiben, soll hier auch auf die Einwirkzeit verwiesen werden. Bei einem Kohlenmonoxid Atemluftanteil von über einem Prozent tritt der Tod binnen ein bis zwei Minuten ein [24, 26].

Das Wasserstoff-Gas und das Methan-Gas sind hochentzündlich. Bei dem entsprechenden Mischungsverhältnis mit Luft kommt es zu einem explosionsfähigen Gemisch. Insofern ist neben der Gasdichtheit der Versuchsanlage sicherzustellen, dass eine ausreichende Durchlüftung im Versuchsraum gegeben ist, um das Entstehen eines explosionsfähigen Gemisches nach einem etwaigen Gasaustritt zu vermeiden.

Da beim Umgang mit diesen Gasen im schlimmsten Fall Lebensgefahr besteht, wurden mehrere Sicherheitssysteme konzipiert und im Versuchsaufbau installiert.

5.6.1 Allgemeine Sicherheitsregeln

Beim Betrieb der Versuchsanlage muss immer das Fenster im Versuchsraum geöffnet sein, um eine Durchlüftung mit Luft zu gewährleisten. Während Durchführung der Messungen soll eine Person außerhalb des Versuchsraums informiert sein.

5.6.2 Sicherheitsgasschrank

Die Gasflaschen für CO, H₂ und CH₄ wurden außerhalb des Versuchsraumes in einem Sicherheitsgasschrank, welcher mit Unterdruck betrieben wird, aufbewahrt. Edelstahlleitungen führen das Gas von den Flaschen aus diesem Schrank zu den Gasentnahmestationen in den Versuchsraum.

5.6.3 Unterdruck

Der Versuchsreaktor wird aus Sicherheitsgründen immer mit Unterdruck betrieben. Dadurch wird sichergestellt, dass keine gefährlichen Gase, zum Beispiel beim Öffnen der Probenahmestutzen zu Probenentnahme entweichen können. Um diesen Unterdruck aufrecht zu erhalten, wird das hausinterne Absaugungssystem sowie ein zusätzlicher Ventilator verwendet, beide Absaugungssysteme werden parallel benutzt. Somit ist immer ein Unterdruck im Reaktor gegeben, auch wenn eines der Systeme ausfällt.

5.6.4 Temperatur

Die verwendeten Versuchsgase sind nur so lange gefährlich, bis sie vollständig verbrannt sind. Nach der Verbrennung mit Sauerstoff sind sie zu ungefährlichem Kohlendioxid und Wasser reagiert. Insofern kann man festhalten, dass eine Flamme und ausreichende Sauerstoffzufuhr im Brennraum Indikatoren für die chemische Reaktion der gefährlichen Gase zu Kohlendioxid und Wasser sind. Eine intakte Flamme ist unmittelbar mit einer hohen Temperatur verbunden. Dies ist keine Garantie für eine vollständige Verbrennung, jedoch wird die Wahrscheinlichkeit für die Bildung vom lebensgefährlichen CO-Gas verringert. Die Temperatur wird mit einem Thermoelement 120 mm über dem Brennerkopf auf der Reaktormittelachse gemessen und das Signal auf ein Anzeigerelais übertragen. Wird ein Temperaturwert von 250 °C unterschritten, kann man darauf rückschließen, dass die Flamme nicht mehr brennt und keine chemische Reaktion mehr stattfindet. Das Anzeigerelais ist elektronisch mit allen Massendurchflusskontrollern, welche das Versuchsgas einregeln, verbunden. Bei Unterschreitung der eingestellten Temperaturschranke unterbricht das Anzeigerelais die Stromzufuhr zu

den Massendurchflusskontrollern und deren Ventile schließen sofort automatisch. Dadurch ist sichergestellt, dass keine gefährlichen Versuchsgase mehr in den Brennraum geleitet werden.

5.6.5 Not-Aus Schalter

Die Stromzufuhr für die Massendurchflusskontroller kann manuell über einen Not-Aus Schalter unterbrochen werden. Dieser ist leicht zugänglich neben dem Reaktor angebracht (siehe Abbildung 50). Bei Stromunterbrechung schließen die Ventile der Massendurchflusskontroller und die Gaszufuhr für den Reaktor ist sofort unterbrochen.



Abbildung 50: Not-Aus Schalter für Versuchsaufbau

5.6.6 Kohlenmonoxid-Sensoren

Beim Hantieren mit Kohlenmonoxid (CO) Gas werden immer zwei mobile CO-Sensoren verwendet, welche die CO-Konzentration in der Atemluft messen (siehe Abbildung 51). Die Sensoren sind in der Nähe vom Reaktor auf verschiedenen Höhen angebracht. Sie sind so eingestellt, dass ein erster akustischer Alarm bei 30 ppm CO und ein weiterer akustischer Alarm bei 60 ppm CO ausgelöst wird.



Abbildung 51: Mobiler CO Sensor

6 Versuchsaufbau – Umbauarbeiten und Optimierungen

Während der Inbetriebnahme des Flammenreaktors und beim Verwenden der Messinstrumente zeigten sich unterschiedlichste Probleme. Diese waren einerseits konstruktionsbedingt und andererseits auf mangelhafte Messgenauigkeit der Messinstrumente zurückzuführen.

Die Probleme bezüglich der Messungenauigkeiten wurden behoben, indem die Messgeräte mittels Referenzmessverfahren evaluiert und teilweise neu kalibriert wurden, um die Messgenauigkeit zu steigern. Die Lösungen der aufgetretenen konstruktionsbedingten Probleme werden in diesem Kapitel im Detail behandelt.

6.1 Unregelmäßige Strömungsverteilung im Gas-Luft Verteiler

Der Gas-Luft Verteiler (siehe Abbildung 40) verteilte die vorgegebenen Gas- und Luftmengen nicht so gleichmäßig auf die Verteilerrohre, wie es die Auslegung der Konstruktion vorsah. Erste Geschwindigkeitsmessungen mit dem LDA-Verfahren zeigten eine unregelmäßige Geschwindigkeitsverteilung über den Einlassöffnungen. Das Gas trat aus dem Rohr im Zentrum und aus den Rohren am kleinen Verteilerring mit einer Gasgeschwindigkeit, bezogen auf Normbedingungen, von 1,5 m/s aus. Der Luftstrom trat aus den Rohren am großen Verteilerkreis mit einer Geschwindigkeit von 1,2 m/s, bezogen auf Normbedingungen, aus. Die Austrittsöffnungen über dem kleinen und großen Verteilerring werden in Diagramm 2 mittels der zwei konzentrischen Kreise schematisch dargestellt. Das Reaktorfenster befindet sich auf der positiven Seite der Ordinate. Man erkennt, dass die Gasaustrittsgeschwindigkeiten aus den Verteilerrohren im hinteren Teil des Reaktors (vom Fenster aus betrachtet) größer sind (siehe Diagramm 2).

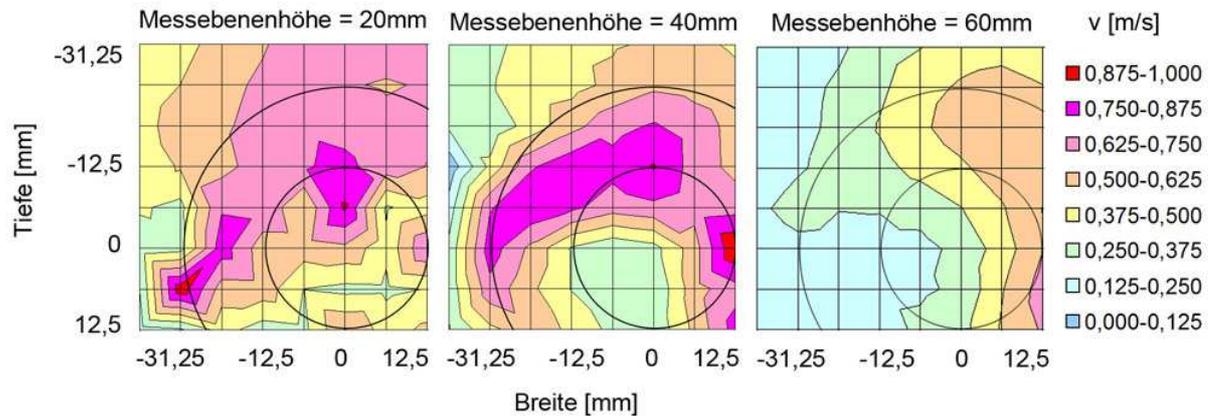


Diagramm 2: Beispiel für eine unregelmäßige Gasgeschwindigkeitsverteilung in der Messkammer über den Verteilerrohren in kalter Strömung

Erläuterung: Das Reaktorfenster befindet sich auf der positiven Seite der Ordinate, der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich über der Achse des Verteilerrohrs im Zentrum

Als Ursache wurden die unterschiedlich langen Zuleitungen sowie die Strömungsführung der Gassplittung vor dem Gas-Luft Verteiler eruiert. Bei der vorgeschalteten Gassplittung mittels eines X-Verbindungstückes strömte der Großteil des Gases direkt gerade durch die Splittung, wogegen die seitlichen Stränge geringer beaufschlagt wurden. Um den Gasstrom symmetrisch aufzuteilen, wurde vor beiden Verteilerringen des Gas-Luft Verteilers eine zylindrische Gassplittungseinheit vorgeschaltet (siehe Abbildung 52).



Abbildung 52: Gassplittereinheit vor Gas-Luft Verteiler

Der Gasstrom tritt nun axial von oben in den Zylinder ein, strömt bis an den Boden, wird dort umgelenkt und tritt an den drei Austrittsöffnungen gleichförmig verteilt wieder aus. Für die Verbindungsleitungen zwischen den neu vorgeschalteten Gassplittungseinheiten und dem Gas-Luft Verteiler wurden jeweils Leitungen gleicher Länge verwendet, um einen gleich verteilten Druckverlust über diese Verbindungsleitungen zu gewährleisten.

Eine Überprüfung der konstruktiven Umbauten wurde mittels einer LDA-Messung in kalter Strömung durchgeführt. Die Messergebnisse werden in Diagramm 3 dargestellt. Man erkennt eine symmetrische Geschwindigkeitsverteilung über die gesamte Messebene. Jeder Punkt im Diagramm spiegelt einen Geschwindigkeitsmesswert wieder. Die Messhöhe befindet sich 95 mm über den Einlassöffnungen für die Gas- und Luftströme. Das Gas tritt aus dem Rohr im Zentrum und aus den Rohren am kleinen Verteilerring mit einer Gasgeschwindigkeit, bezogen auf Normbedingungen, von 2 m/s aus. Der Luftstrom tritt aus den Rohren am großen Verteilerkreis mit einer Geschwindigkeit von 1,6 m/s, bezogen auf Normbedingungen, aus. Alle Messwerte innerhalb der Kreisfläche mit dem Durchmesser $D_1=34$ mm werden gemittelt und ergeben eine gemittelte Strömungsgeschwindigkeit von $\bar{v}_1=1,3$ m/s, bezogen auf den Umgebungszustand. Die gemittelten Geschwindigkeitswerte innerhalb des Kreisflächensegments mit dem Außendurchmesser $D_2=60$ mm und dem Innendurchmesser $D_1=34$ mm ergeben eine Geschwindigkeit von $\bar{v}_2=0,76$ m/s, bezogen auf den Umgebungszustand.

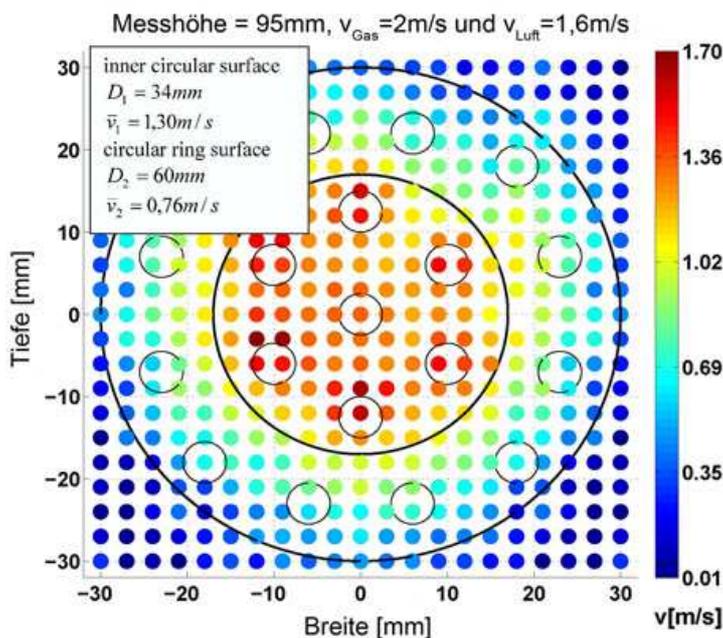


Diagramm 3: Beispiel für eine regelmäßige Gasgeschwindigkeitsverteilung in der Messkammer über den Verteilerrohren in kalter Strömung

Erläuterung: Das Reaktorfenster befindet sich auf der negativen Seite der Ordinate, der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich über der Achse des Verteilerrohrs im Zentrum

Die optische Kontrolle der Symmetrie der Strömung bzw. der Flamme nach den Umbauarbeiten erfolgte mittels einer vorgemischten Methan-Luft-Flamme mit einem Lambda für die

Vormischung von 0,6 und einem Gesamtlambda im Reaktorraum von 1,5. Die Verbrennungsgasgeschwindigkeit am Eintritt in den Reaktor beträgt 2m/s. Man erkennt an den Höhen der einzelnen Flammen, dass die Gasverteilung nach dem Umbau symmetrisch ist. Daraus wird weiteres geschlossen, dass auch die Verteilung der Luft symmetrisch erfolgt.

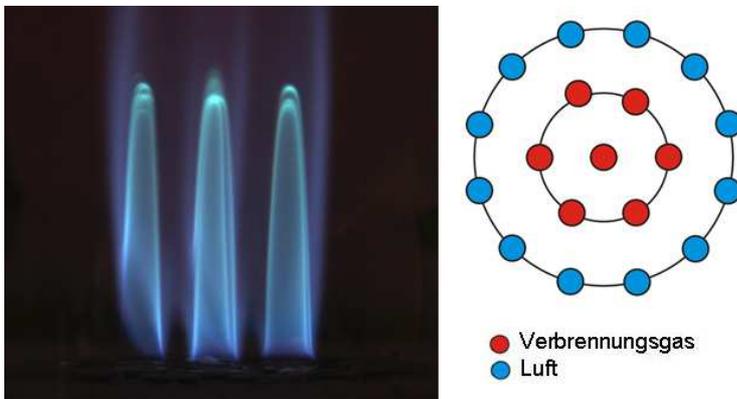


Abbildung 53: Regelmäßige Strömungsverteilung im Gas-Luft Verteiler für Flamme

6.2 Änderungen der Durchflussmengen der Versuchsgase

Die Mass-Flow-Controller (MFC) waren beim ersten Versuchsaufbau auf einen breiten Einsatzbereich bezüglich der Volumenstromregelung ausgelegt. Im Laufe der Vorversuche wurden die Versuchsparameter geändert und die Regelbereiche der MFC mussten neu angepasst werden. Die MFC wurden entweder gewechselt oder auf einen neuen Regelbereich umgebaut. Zusätzlich wurde das Rotameter, welches beim Versuchsaufbau die Lambdaregelung für die Gesamtluft in der Brennkammer übernimmt, durch einen entsprechenden MFC ersetzt. Tabelle 6 zeigt alle verwendeten MFC mit den wichtigsten Spezifikationen.

Tabelle 6: MFC für Entwicklungsstufe 2 Versuchsaufbau

Erläuterung: Quelle [27]

Gasart	MFC Bauweise	Maximaler Durchfluss	Dynamik	Abweichung vom Endwert	Abweichung vom Messwert
		[Nl/min]	[-]	[%]	[%]
CO	Sonderfall	6	1:100	1,5	
H2	Standard	5	1:100	1,5	
CH4	Standard	5	1:100	1,5	
CO2	High performace	30	1:30	0,3	0,5
N2	High performace	50	1:30	0,3	0,5
Luft	High performace	100	1:30	0,3	0,5

Die Bauweise, wie in Tabelle Tabelle 6 beschrieben, gibt Aufschluss über die endgültige Genauigkeit der Geräte. Die Dynamik beschreibt den kleinsten möglichen Durchfluss des MFC. Eine Dynamik 1:100 bedeutet, dass der kleinste Durchfluss ein Hundertstel des maximalen Durchflusses beträgt. Umso größer die Dynamik, desto größer ist auch der Regelbereich des Gerätes. Bei den High-Performance-Geräten ergibt sich die gesamte Genauigkeit aus der Summe der Endwertabweichung und der Messwertabweichung.

6.3 Falschluff im Reaktor

Im Laufe der Vorversuche wurde erkannt, dass ein Falschluffstrom in den Reaktor eintritt und die Messwerte maßgeblich verfälscht. Der Eintrittsort dieses Falschluffstroms wurde durch ein in diesem Kapitel beschriebenes Experiment eruiert.

Es wurde eine definierte N₂/CO₂-Gasmischung, mit einer CO₂-Konzentration von 12 Vol%, dem Reaktor zugeführt. Mit der FTIR wurde nun an verschiedenen Positionen des Mischungssystems, des Gas-Luft Verteilers und im Reaktor die CO₂-Konzentration gemessen. Da bei allen Messpositionen ein Unterdruck vorherrschte, wäre im Falle einer Undichtheit Umgebungsluft in das System eingetreten und die Gasmischung verdünnt und dadurch die CO₂-Konzentration reduziert. Das Experiment zeigte, dass ein Teil des gewollten Fremdluftstroms, welcher für die Verdünnung des Abgases (siehe Kapitel 5.5) benötigt wird, in den Reaktorraum als Falschluffstrom rückströmt. Diese Strömungssituation wird in Kapitel 6.4 näher untersucht.

Abbildung 54 zeigt den CO₂-Konzentrationsverlauf mit und ohne Fremdluftzufuhr entlang des Strömungsweges vom Vermischen der Gase bis in die Reaktorkammer. In allen Messstellen sollte sich eine CO₂-Konzentration von 12 Vol% einstellen. Man erkennt, dass die CO₂-Konzentration mit Fremdluftzufuhr direkt über der Absaughaube im Reaktorraum auf 6 bis 7 Vol% gesunken ist. Ohne Fremdluftzufuhr bleibt die CO₂-Konzentration in allen Messpunkten nahezu konstant.

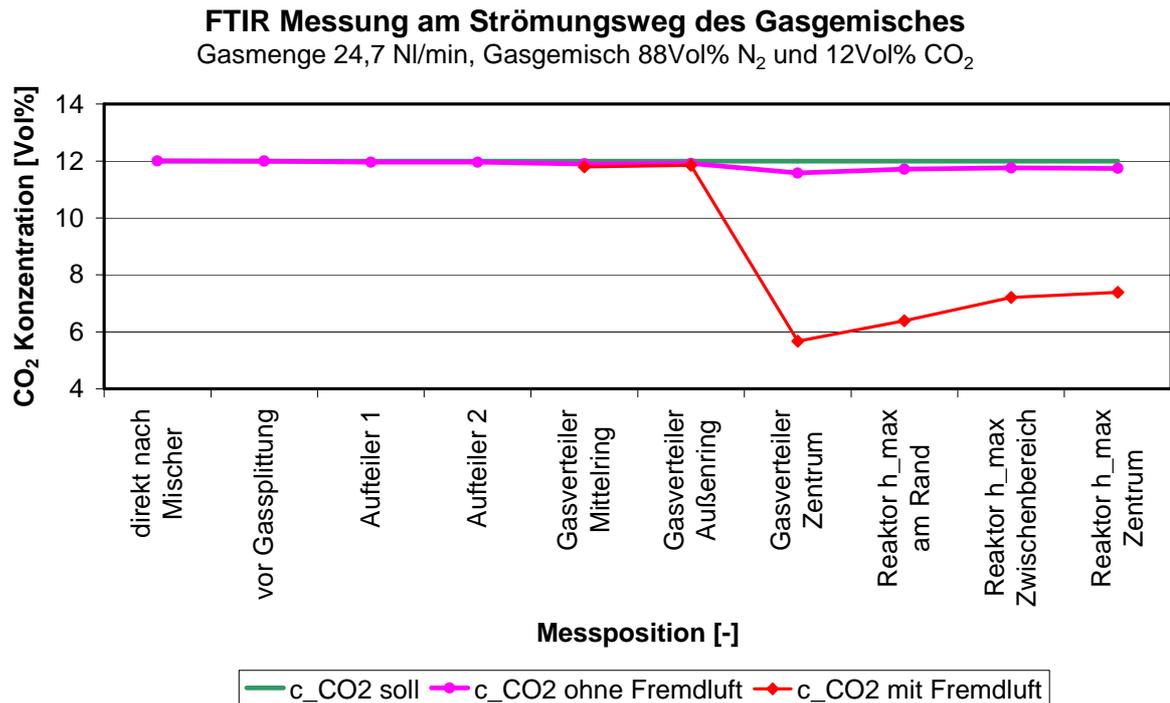


Abbildung 54: CO₂-Gaskonzentration mit und ohne Fremdluftzufuhr im Kamin des Reaktors

Die Anordnung der Löcher für die Fremdluftzufuhr in der Absaughaube der ersten Entwicklungsstufe (siehe Abbildung 49) führte zum Eintritt eines Falschlufstroms von ca. 20 NI/min. Um dies zu verhindern, wurden die Löcher für die Fremdluftzufuhr im Kamin weiter entfernt von der Absaughaube und nach einem 90 Grad Krümmer angebracht. Das Kaminrohr wurde gasdicht mit einem Hochtemperatursilikon auf der Absaughaube verklebt. Nach diesen Umbaumaßnahmen (siehe Abbildung 55) bleibt ein Falschlufstrom von ca. 0,55 NI/min bei einem Reaktorunterdruck von -10 Pa in der Messkammer erhalten. Die Ursache für diesen Falschlufstrom wurde nicht weiter untersucht, da er sehr klein ist.



Abbildung 55: Absaughaube für Entwicklungsstufe 2 Versuchsaufbau

6.4 Strömungsverlauf der Falschluff im Reaktor

Der zylindrische Messraum im Reaktor ist konstruktionsbedingt über das Dämmelement am Boden und die Dämmelemente an den Seiten nicht gasdicht abgeschlossen. Luft bzw. Gas strömten über den Schlitz zwischen Reaktordämmung und Reaktormantel sowie über die Schlitze zwischen den verschiebbaren Dämmelementen nach unten und bildeten den Strömungseintritt der Rezirkulation (siehe Abbildung 56). Diese Schlitze sind auf Fertigungs- und Montagetoleranzen zurückzuführen.

Aufgrund der Oberflächenrauigkeit des Dämmmaterials ergab sich ein Spalt zwischen Reaktorboden und allen aufliegenden Dämmelementen. Über diese Spaltfläche konnten sich die nach unten geströmten Gase auf den gesamten Querschnitt des Reaktorbodens verteilen.

Als Querschnitt für den Strömungsausstritt fungierten der Spalt zwischen dem inneren Dämmzylinder und der äußeren Dämmung sowie die Spalten zwischen Dämmzylinderbohrungen und den Einlassrohren (siehe Abbildung 56). Über diese Querschnitte strömte das Gas nach oben in den Messraum. Speziell der Teil der Strömung, welche über die Spalten um die 19 Einlassrohre in den Reaktorraum eintrat, verdünnte das Versuchsgas und verfälschte maßgeblich die Messergebnisse.

Abbildung 56 zeigt im linken Bild die Spalten für den Strömungseintritt und im rechten Bild für den Strömungsausritt.

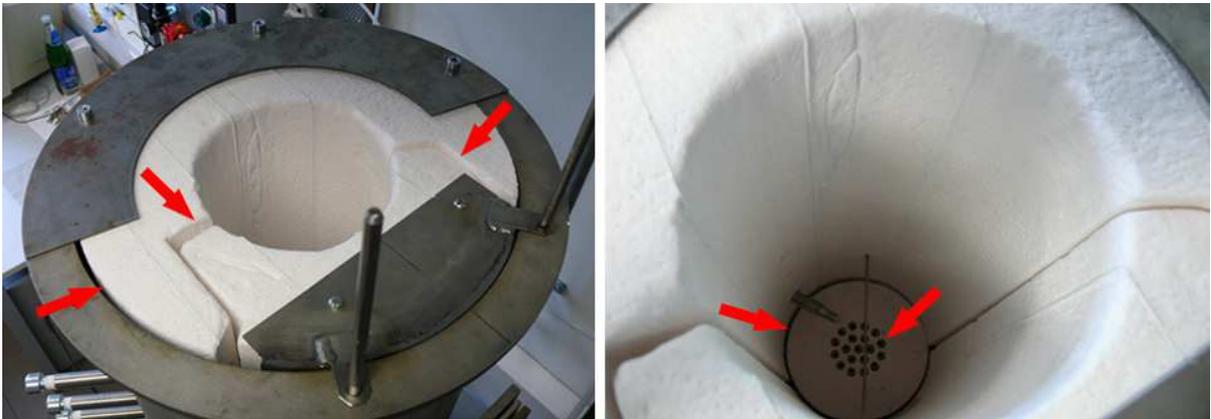


Abbildung 56: Keramikfaserdämmung vor Optimierungsanpassungen

Die gesamte Strömungssituation, welche sich aufgrund der Spalten ergibt wird in Abbildung 57 dargestellt.

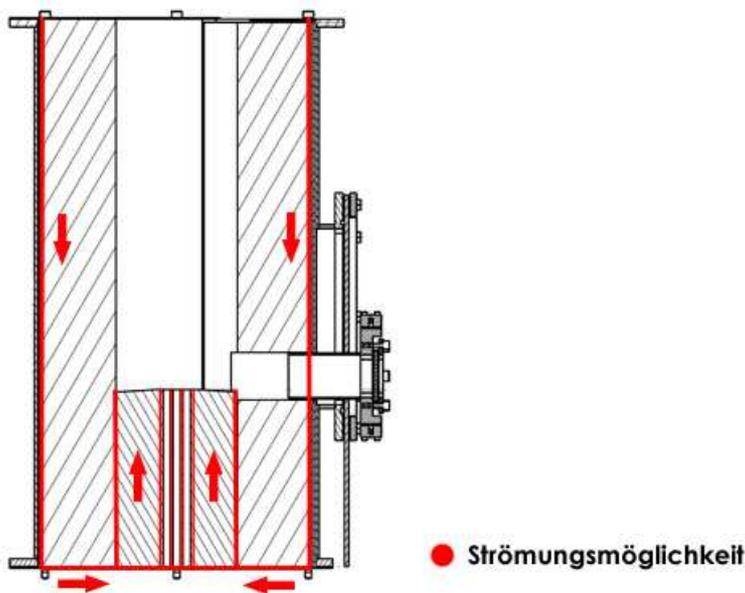


Abbildung 57: Reaktorquerschnitt mit Strömungssituation vor Optimierungsanpassungen

Um diese ungewollte Strömungssituation zu vermeiden, wurden in einem Optimierungsschritt durch Formgestaltung der Schiebelementdämmung und deren neuen Positionierung, die Schlitzte zwischen Reaktordämmung und Schiebeelement beseitigt. Weiters wurde eine feuerfeste Keramikfaserpapierdichtung zwischen Reaktor und Absaughaube verwendet, um den Eintritt von Falschluff zu unterbinden (siehe Abbildung 58).



Abbildung 58: Keramikfaserdämmung nach Optimierungsanpassungen

Um die Strömungsmöglichkeit am Boden des Reaktors zu verhindern, wurde eine feuerfeste Dichtung aus Keramikfaserpapier über den gesamten Querschnitt eingebaut. Die Dichtung ist in Abbildung 59 in grün dargestellt. Diese verhindert eine Strömungsmöglichkeit zwischen den weiterhin bestehenden horizontalen Schlitzen im inneren und äußeren Bereich des Reaktors. Da aufgrund dieser Dichtung die Rezirkulation im Bereich des Reaktorbodens unterbrochen wird, ist eine aufwändige Abdichtung der bestehenden horizontalen Schlitze nicht mehr notwendig.

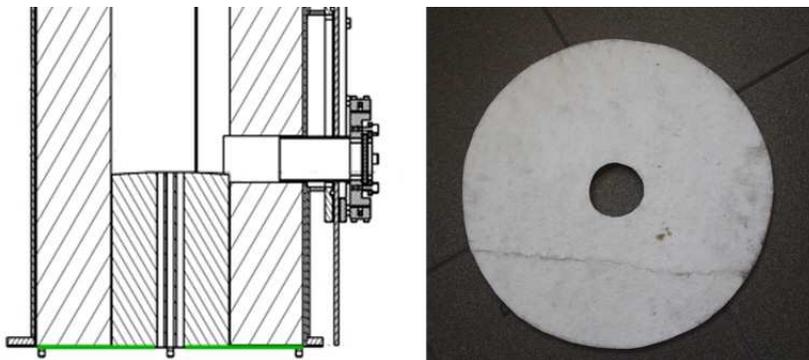


Abbildung 59: Keramikfaserpapierdichtung am Reaktorboden

6.5 Höhenverstellung des Sichtfensters

Auf Grund der im vorhergehenden Kapitel beschriebener Umbauten reduzierte sich der horizontale Verschiebungsbereich des Messfensters von 200 mm auf 177 mm. Trotz der weiterhin bestehenden Verstellmöglichkeiten des Messfensters wurden für diese dieser Arbeit keine Versuche mit verschiedenen Höhen des Fensters durchgeführt, um die Strömungssituation im Reaktor nicht negativ zu beeinflussen. Das würde eintreten da bei Höhenverstellung des Fensters die Dichtung am Reaktorboden nicht mehr vollständig wirksam wäre und es zu

einer weiteren Rückströmungsmöglichkeit im Reaktorraum (siehe Abbildung 60) käme. In wie weit sich das Verstellen des Fensters tatsächlich auf Messergebnisse auswirken würde, wurde im Rahmen diese Arbeit nicht untersucht.

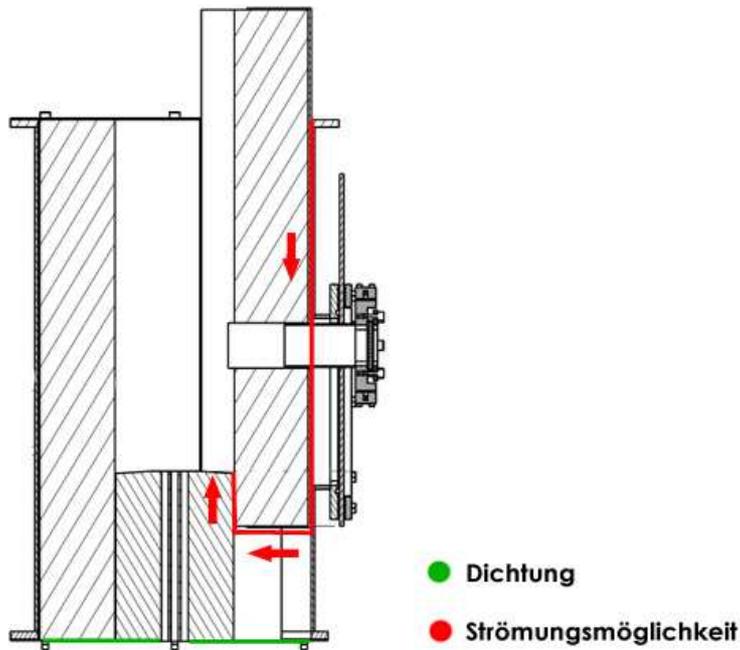


Abbildung 60: Strömungsmöglichkeit bei Höhenverstellung des Fensters

6.6 Spannungen im Reaktorfenster

Ursprünglich wurden für das Reaktorfenster (siehe Abbildung 35) herkömmliche Fenstergläser bzw. temperaturbeständige, handelsübliche Ofen gläser verwendet, die unter den vorliegenden thermischen und mechanischen Spannungen nicht stabil genug waren.

Eine neue Montagetechnik des Fensters konnte diese Spannungen beseitigen. Herkömmliches Fensterglas wurde mit Hochtemperatursilikon auf den Fensterrahmen geklebt. Dem Rahmen wiederum ist eine Grafitdichtung unterlegt und kann mit maximaler Vorspannkraft gasdicht mit dem Fenster-Schiebeelement verschraubt werden (siehe Abbildung 61). Diese neue Konstruktion mit herkömmlichem Fensterglas hält allen Ansprüchen der kalten Versuchsreihen und der Flammenversuchsreihen stand.

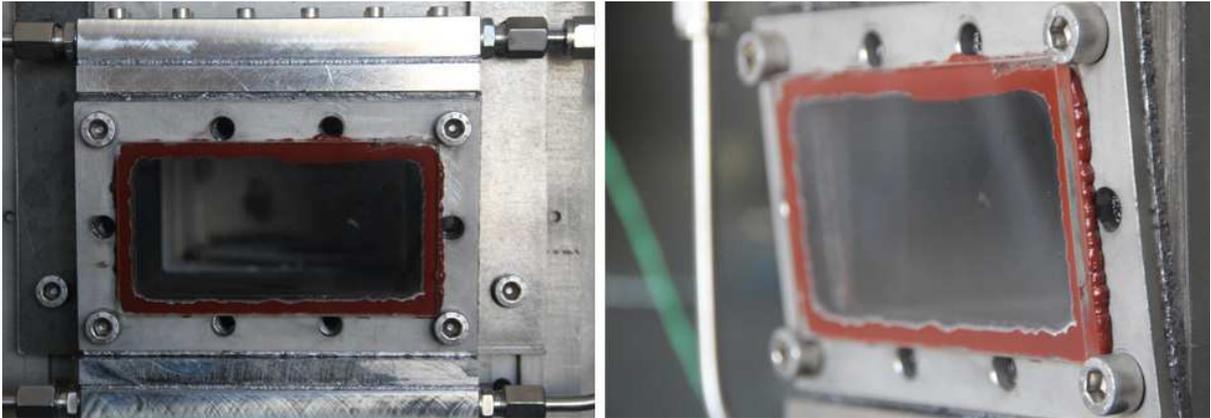


Abbildung 61: Fenster mit Hochtemperatur-Silikondichtung

6.7 Flammenstabilität und Verbrennungsgas

Vorversuche haben gezeigt, dass Flammenversuche mit dem ursprünglich geplanten Versuchsgasgemisch, bestehend aus 12 Vol% CH_4 , 2 Vol% H_2 , 18 Vol% CO , 60 Vol% N_2 , und 8 Vol% CO_2 bei dem geplanten Versuchsaufbau keine stabile Flamme bilden. Lambda- und Gasgeschwindigkeitsvariationen führten zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis.

Ziel war es, stabile partiell vorgemischte Flammen (siehe Kapitel 2.3) mit Gasaustrittsgeschwindigkeiten, bezogen auf Normbedingungen, zu erzeugen, welche den Gasgeschwindigkeiten über dem Brennstoffbett in Biomasse Rostfeuerungen entsprechen. Geplante Gasgeschwindigkeiten am Austritt der Verteilerrohre waren 2, 3 und 4 m/s. Weiteres wurde ein Lambda Gesamt von 1,5 angenommen werden, welches einen typischen Wert für Biomasse Rostfeuerungen darstellt (siehe Kapitel 3.3).

Um die Versuchsbedingungen zu vereinfachen und eine stabile Flamme zu erzielen, wurde in den weiteren Versuchen 100 Vol% CH_4 als Verbrennungsgas verwendet. Der äußere Verteilerring wurde mit Luft beaufschlagt und der innere Verteilerring und das Zentrum mit einem Gasgemisch aus CH_4 -Brenngas und Luft. Der Grad der Vormischung dieses Gasgemisches soll eine stabile Flamme auch bei einer maximalen Ausströmgeschwindigkeit des Gases von 4 m/s (Maximalwert), bezogen auf Normbedingungen, gewährleisten..

Flammenfotografien der Vorversuche haben gezeigt, dass bei einem Vormischungslambda kleiner 0,4 und größer 0,6 keine stabile Flamme mit einer Gasströmungsgeschwindigkeit von 4 m/s erzeugt werden kann. Bei einem Vormischungslambda kleiner 0,6 und einer Gasströmungsgeschwindigkeit von 4 m/s wird ein CH_4 -Volumenstrom benötigt, welcher außerhalb des CH_4 -MFC Regelbereichs liegt. Deshalb wird für die Flammenfotografie-Versuchsreihe ein Rotameter zur CH_4 Regelung benutzt, welches einen größeren Regelbereich hat.

Die Ergebnisse der Flammenfotografie werden in Tabelle 7 dargestellt. Bei einer getesteten Geschwindigkeit von $v_{\text{Gas}}=4$ m/s bestehen weiterhin stabile Flammen, jedoch wurden diese nicht auf Fotos festgehalten.

Tabelle 7: Flammenfotos einer CH_4/Luft Flamme bei Variation der Brenngasgeschwindigkeit und des Vormischungslambdas

Erläuterung: Volumenströme mittels Rotameter geregelt, für $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$ bestehen stabile Flammen (Fotos nicht vorhanden)

	Brenngas Austrittsgeschwindigkeit aus Verteilerrohren auf Normbedingungen bezogen		
	$v_{\text{Gas}}= 2\text{m/s}$	$v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$	$v_{\text{Gas}}=3,5\text{m/s}$
$\lambda_{\text{Vormischung}} = 0,4$ $\lambda_{\text{Gesamt}} = 1,5$			
$\lambda_{\text{Vormischung}} = 0,5$ $\lambda_{\text{Gesamt}} = 1,5$			
$\lambda_{\text{Vormischung}} = 0,6$ $\lambda_{\text{Gesamt}} = 1,5$			

Aufgrund dieser Ergebnisse, wurde für die Versuchsmatrix der Flammenmessungen (siehe Kapitel 7.3) eine vorgemischte Methan/Luft Flamme mit einem Vormischungslambda von 0,4 und einem Gesamtlambda von 1,5 gewählt. Diese Flammen erfüllen die Stabilitätsbedingungen über einen Geschwindigkeitsbereich von $v_{\text{Gas}}=2$ m/s bis $v_{\text{Gas}}=4$ m/s und entsprechen den typischen Geschwindigkeiten über dem Brennstoffbett einer Biomasse Rostfeuerung (siehe Tabelle 3).

7 Versuchsaufbau - Entwicklungsstufe 2

Der Versuchsaufbau der zweiten Entwicklungsstufe basiert auf allen bestehenden Komponenten der ersten Entwicklungsstufe (siehe Kapitel 5). Davon ausgehend, wurden konstruktive Umbauarbeiten und Änderungen des Versuchsgases vorgenommen (siehe Kapitel 6).

7.1 Fließbild für Messungen in kalter Strömung

Eine vereinfachte Übersicht über die Gas- und Luftführung für die kalten Messungen ist im Fließbild in der Abbildung 62 dargestellt.

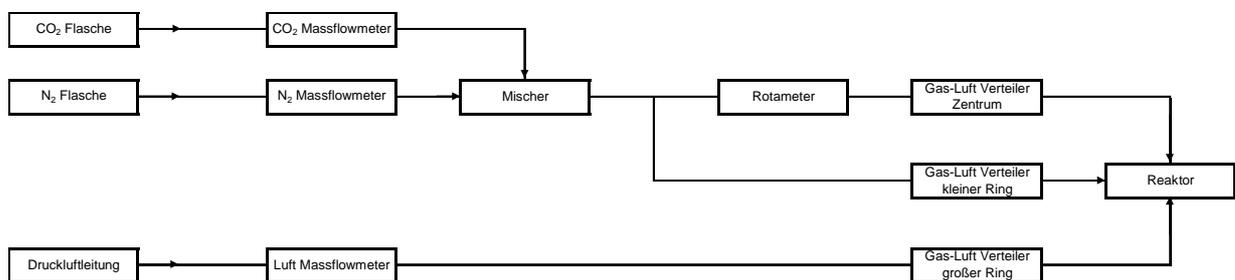


Abbildung 62: Fließbild für kalte Messungen

Für die kalten Messungen wird mittels zwei MFC ein CO₂/N₂ Gasgemisch erzeugt. Das Gemisch wird vor der Einleitung in den Reaktor mittels eines Rotameters gesplittet und über den Gas-Luft Verteiler symmetrisch auf die Verteilerrohre des Zentrums und des kleinen Verteilerrings aufgeteilt. Der Luftstrom wird mittels eines MFC eingestellt und über den Gas-Luftverteiler auf die Verteilerrohre des großen Verteilerring symmetrisch gesplittet.

7.2 Fließbild für Messungen in Flammen

Aufgrund der Änderungen im Versuchsaufbau und des Versuchsgases entsprachen einige Durchflüsse für die Flammenversuche nicht mehr den Auslegungsparametern der Regeleinrichtungen. Deshalb wurden Regelgeräte parallel geschaltet bzw. der N₂-MFC für die Regelung eines Luftstromes verwendet.

Eine vereinfachte Übersicht über die Brenngas- und Luftführung bei Flammenmessungen zeigt das Fließbild in Abbildung 63.

Da für diesen Versuchsaufbau nicht alle gasspezifischen Regeleinrichtungen mit ausreichender Genauigkeit vorhanden waren, wurden folgende Regeleinrichtungen wie folgt verwendet. Der CH₄-MFC kann für die gewählte Messmatrix nicht den erforderlichen Durchfluss regeln. Deshalb wurde ein Rotameter parallel geschaltet, um den notwendigen Durchfluss zu kom-

pensieren. Der CH_4 Durchfluss für das Rotameter wurde zuvor mittels des CH_4 -MFC kalibriert und entspricht somit der Genauigkeit des CH_4 -MFC. Für die Regelung des Vormischungs-Luftstroms wurde der N_2 -MFC benutzt. Luft und N_2 haben nahezu identische Eigenschaften bezüglich der Regelung mit diesen MFC. Aufgrund dieser Ähnlichkeit werden laut Gerätehersteller Vögtlin N_2 -MFC mittels Luft kalibriert und auch die Garantieprotokolle erstellt. Somit wird bei diesem Versuchsaufbau von der angegebenen N_2 -Regelgenauigkeit auch für die Luft Regelung ausgegangen.

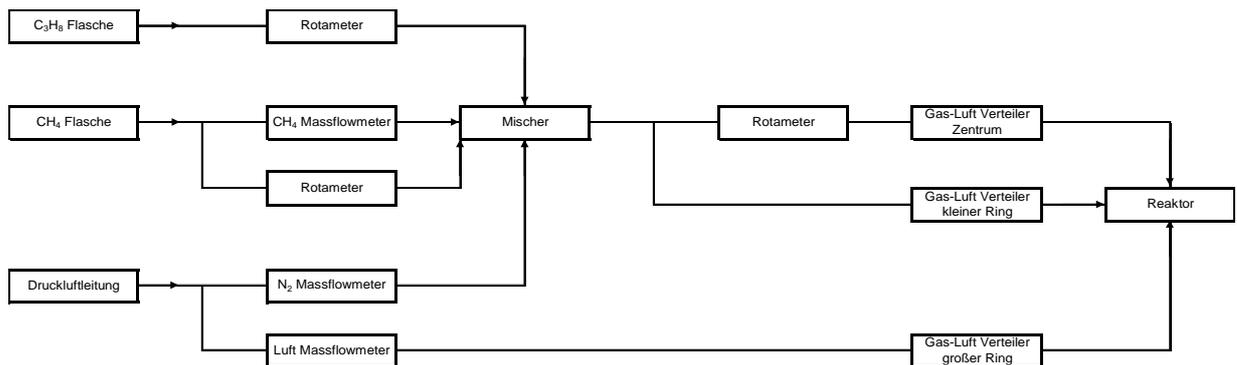


Abbildung 63: Fließbild für die Flammenmessungen

Das Brenngasgemisch besteht aus CH_4 und Luft. Für die Zündung der Flamme wird Propan verwendet, welches über ein Rotameter geregelt wird. Alle Ströme werden in einer statischen Mischereinheit zum Brenngasgemisch vermischt. Das Gemisch wird vor der Einleitung in den Reaktor mittels eines Rotameters gesplittet und über den Gas-Luft Verteiler symmetrisch auf die Verteilerrohre des Zentrums und des kleinen Verteilerrings aufgeteilt. Der Luftstrom wird mittels eines MFC eingestellt und über den Gas-Luftverteiler auf die Verteilerrohre des großen Verteilerring symmetrisch aufgeteilt.

7.3 Versuchsmatrix

Die Gas- und Luftmengen sowie das Gesamtlambda wurden im Rahmen der Versuchsmatrix für die kalten Versuche und die Flammenversuche so gewählt, dass sie den Strömungs- und Verbrennungsbedingungen in Biomasse Rostfeuerungen entsprechen. Die Volumenströme sollen mittels der Gas- Luftverteilereinheit, für Biomasse Rostfeuerungen typische Gasströmungsgeschwindigkeiten erzeugen, die zwecks Vergleichbarkeit, für die kalten Versuche und die Flammenversuche identisch sind. Auf Basis dieser Gasgeschwindigkeiten können Reynoldszahlen (siehe Kapitel 2.4) berechnet werden, um die Strömungsturbulenz im Reaktor zu charakterisieren und mit der Strömungsturbulenz in Biomasse Rostfeuerungen zu vergleichen. Das gewählte Gesamtlambda für die Flammenversuche wurde für einen in Biomasse Rostfeu-

erungen typischen Größenordnungsbereich gewählt. Das Vormischungslambda kann für Rostfeuerungen, aufgrund komplexer Einflüsse, nicht explizit definiert werden. Für die Versuchsmatrix wurde das Vormischungslambda auf Basis der Ergebnisse aus Tabelle 7 zur Stabilisierung der Flamme gewählt. Um den Einfluss der Gas- und Luftstrahlen auf den Mischungsfortschritt zu untersuchen, wurde für die kalten Versuche und die Flammenversuche das jeweilige Gasgemisch über das Zentrum und den kleinen Verteilerring symmetrisch in den Reaktor eingeleitet. Der Luftstrom wird über den großen Verteilerring aufgegeben. Abbildung 64 zeigt die Versuchsgas- und Luftverteilung für die kalten Versuche und die Flammenmessungen.

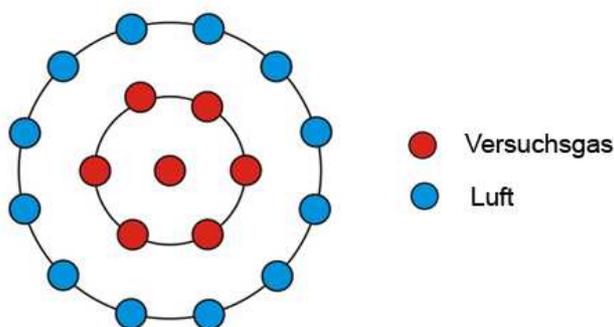


Abbildung 64: Versuchsgas- und Luftverteilung für kalte Versuche und Flammenversuche

Die Versuchsmatrix für die kalten Versuche wurde im Detail unter folgenden Gesichtspunkten gewählt. Es sollte eine Versuchsmatrix für Flammenversuche aufgestellt werden und für die kalten Messungen sollten die gleichen Volumenstrommengen verwendet werden. Die Gassezies CH_4 bei den Flammenversuchen sollte durch CO_2 (Tracergas) ersetzt werden Es sollte das kleinstmögliche Vormischungslambda von 0,6 verwendet werden. Ein kleineres Vormischungslambda führte dazu, dass bei einer Strömungsgeschwindigkeit des Gases von 4 m/s der notwendige CH_4 -Volumenstrom außerhalb des Regelbereichs des CH_4 -MFC liegt. Eingestellt wurde ein Lambda von 1,5 zwischen dem Gesamtluftstrom und dem Gasgemischstrom. Dies führt zu einem gesamten Lambda im Reaktor von 2,1

Tabelle 8: Referenzwerte einer Flammen-Versuchsmatrix zur Erstellung der kalten Versuchsmatrix

Referenzwerte einer warmen Versuchsmatrix zur Erstellung der kalten Versuchsmatrix							
Geschwindigkeit		Gasgemisch			Luftstrom	Lambda	
v_{Gas} [m/s]	v_{Luft} [m/s]	CH ₄ [NI/min]	Luft [NI/min]	Gasgemischsumme [NI/min]	Luft [NI/min]	$\lambda_{\text{Vormischung}}$ [-]	λ_{Gesamt} [-]
2,00	2,48	2,46	14,04	16,50	35,10	0,6	2,1
3,00	3,72	3,69	21,05	24,74	52,64	0,6	2,1
4,00	4,97	4,91	28,07	32,98	70,20	0,6	2,1

Auf Basis dieser Volumenströme wurden für die Erstellung der kalte Versuchsmatrix der CH₄-Strom und der vorgemischte Luftstrom durch CO₂ und N₂ ersetzt. Die verwendeten Volumenströme werden in Tabelle 9 dargestellt. Aufgrund der Rundungsfehler ergab sich eine CO₂-Mischkonzentrationsabweichung für die Versuchsreihe mit $v_{\text{Gas}}=4$ m/s.

Tabelle 9: Versuchsmatrix für Versuche in kalter Strömung

Versuchsmatrix für kalte Versuchsreihen						
Geschwindigkeit		Gasgemisch			Luftstrom	Konzentration
v_{Gas} [m/s]	v_{Luft} [m/s]	CO ₂ [NI/min]	N ₂ [NI/min]	Gasgemischsumme [NI/min]	Luft [NI/min]	$c_{\text{CO}_2, \text{vermisch}}$ [Vol%]
2,00	2,48	2,46	14,04	16,50	35,10	4,77
3,00	3,72	3,69	21,05	24,74	52,64	4,77
4,00	4,97	4,91	28,07	32,98	70,20	4,76

Die Versuchsmatrix für die Flammenversuche wurde unter folgenden Gesichtspunkten gewählt. Die Volumenströme wurden so gewählt, dass sie Gasgeschwindigkeiten von 2,3 und 4 m/s ergaben und mit den kalten Versuchen vergleichbar sind. Aufgrund der Möglichkeit des parallelen Betriebes des CH₄-MFC und eines Rotameters mit einer Regelgenauigkeit des CH₄-MFC (siehe Kapitel 7.2) wurde entschieden, ein kleineres Vormischungslambda als 0,6 zu verwenden. Somit konnte ein größerer CH₄-Volumenfluss eingestellt werden und ein Vormischungslambda von 0,4 realisiert werden. Auf Basis der Erkenntnisse aus Tabelle 7 wurde weiteres ein gesamtes Lambda für den Reaktor von 1,5 eingestellt. Die verwendeten Volumenströme werden in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Versuchsmatrix für Flammenversuche

Versuchsmatrix für warme Versuchsreihen							
Geschwindigkeit		Versuchsgas			Luftstrom	Lambda	
v_{Gas} [m/s]	v_{Luft} [m/s]	CH ₄ [NI/min]	Luft [NI/min]	Gassumme [NI/min]	Luft [NI/min]	$\lambda_{\text{Vormischung}}$ [-]	λ_{Gesamt} [-]
2,00	2,54	3,43	13,06	16,49	35,90	0,4	1,5
3,00	3,81	5,15	19,59	24,74	53,90	0,4	1,5
4,00	5,08	6,86	26,13	32,99	71,85	0,4	1,5

Die Volumenströme wurden mittels Regelgeräten, auf Normbedingungen bezogen, eingestellt. Normliter werden auf eine Normtemperatur von 273,13 K und einen Normdruck von 1,0133 bar bezogen. Die Gas- und Luftgeschwindigkeiten sind abhängig vom Volumenstrom und der Austrittsquerschnittsfläche (siehe Formel 7). Bei diesem Versuchsaufbau ist die Querschnittsfläche über die freie Kreisfläche der Verteilerrohre als konstant gegeben.

$$v = \frac{\dot{V}_n}{A}$$

Formel 7: Geschwindigkeitsberechnung aus Volumenstrom

Erläuterung: v ...Geschwindigkeit des Gases oder Fluids [m/s], \dot{V}_n ...Volumenstrom [Nm³/s], A ... Querschnittsfläche senkrecht zur Strömungsrichtung [m²]

Der Volumenstrom ist vom Druck und der Temperatur beim Austritt aus den Verteilerrohren abhängig (siehe Formel 8).

$$\dot{V}_n = \frac{\dot{n} \cdot R \cdot T_n}{p_n}$$

Formel 8: Ideale Gasgleichung

Erläuterung: \dot{V}_n ...Volumenstrom [Nm³/s], \dot{n} ...Molenstrom [kmol/s], R ...allgemeine Gaskonstante [J/kmolK], T_n ...Normtemperatur [K], p_n ... Normdruck [Pa]

7.4 Messpositionen

Über der kalten Strömung bzw. über der Flamme können konstruktionsbedingt aus zwei Richtungen Proben entnommen werden. In Abbildung 65 sind beide Möglichkeiten dargestellt. Für die Messergebnisse in dieser Diplomarbeit wurde die Probenahmemöglichkeit 1 gewählt, um die Vermischung zwischen den Gas- und Luftstrahlen vermessen zu können.

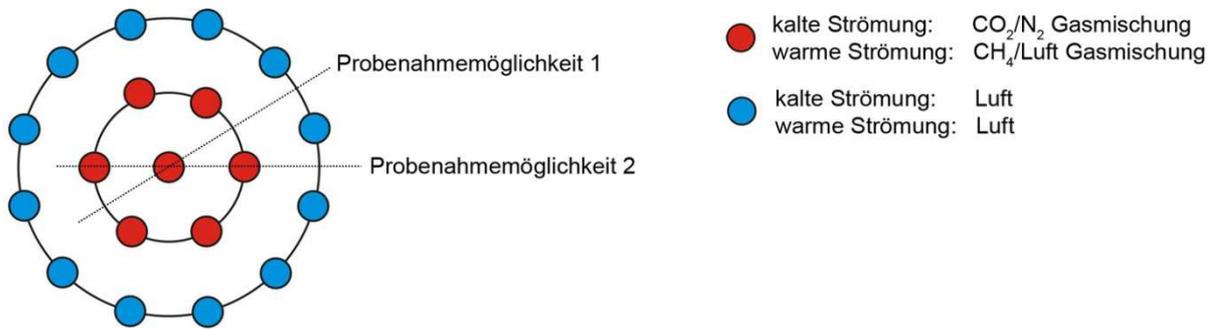


Abbildung 65: Messpositionsrichtung

Mittels der Probenahmelanze können über jeden Probenahmestutzen Gasproben entnommen werden. Die Probenahmelanze ist in Achsrichtung des Probenahmestutzens stufenlos verschiebbar und es können an beliebigen Positionen entlang dieses Achsabstandes Gasproben entnommen werden (siehe Kapitel 5.4.5). Für die Messungen in dieser Diplomarbeit wurde eine Messauflösung von 6,25 mm, wie in Abbildung 66 dargestellt, verwendet. Da die Strömung als rotationssymmetrisch angenommen wurde, wurden nicht bei allen Messreihen alle Punkte auf beiden Seiten der Symmetrieachse über den Achsabstand vermessen.

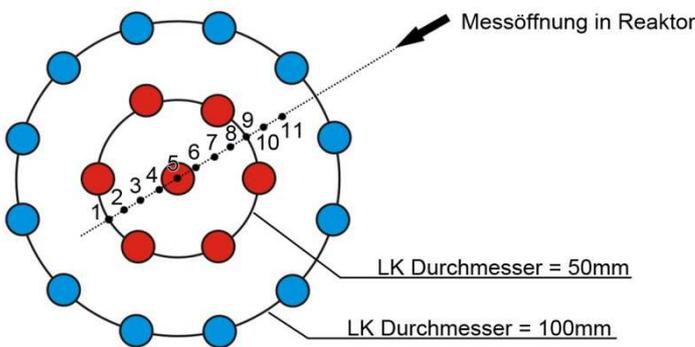


Abbildung 66: Messpositionen über den Achsabstand

Die Messpositionen (1,2...10,11) werden in den ausgewerteten Diagrammen in den Kapiteln 7 und 0 über den Achsabstand in mm angegeben. Aufgrund der Rotationssymmetrie wird die Messposition 5 mit dem Wert 0 mm angenommen. Ausgehend vom Zentrum wird die Entfernung in Richtung Messöffnung mit negativen Werten angegeben (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Messposition gekoppelt mit Messtiefe in mm

Position 11	Position 10	Position 9	Position 8	Position 7	Position 6	Position 5	Position 4	Position 3	Position 2	Position 1
Achsabstand [mm]										
-37,5	-31,25	-25	-18,75	-12,5	-6,25	0	6,25	12,5	18,75	25

Die Konstruktion des Reaktors erlaubt es auf fünf verschiedenen Höhen über dem Brennerkopf Proben zu entnehmen. Die verschiedenen Messhöhen befinden sich 15 mm, 55 mm, 95 mm, 145 mm und 205 mm über dem Brennerkopf (siehe Abbildung 67). Für die Messungen in dieser Diplomarbeit wurden die Messhöhen H15, H55 und H205 gewählt.

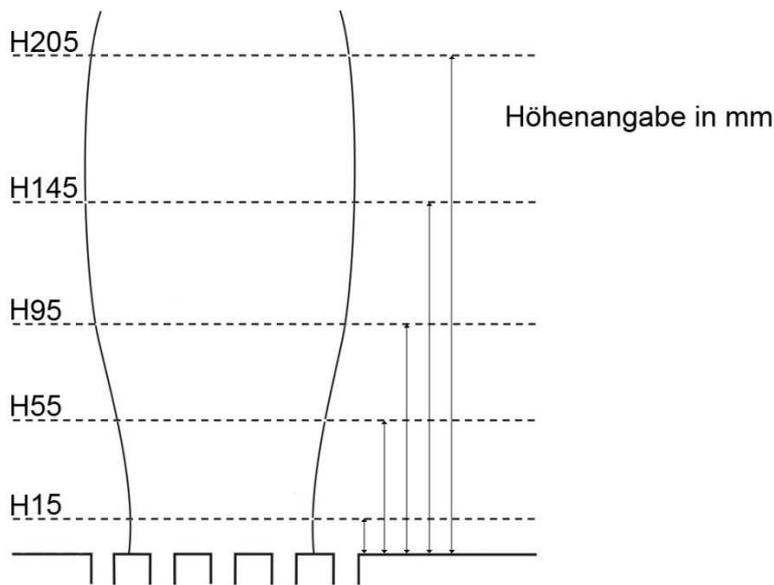


Abbildung 67: Messpositionen über die Messhöhe

7.5 Messgenauigkeit

In diesem Kapitel werden die Messgenauigkeiten der verwendeten Messgeräte, welche bei den kalten Versuchen und den Flammenversuchen verwendet wurden, beschrieben.

7.5.1 Messgenauigkeit bei Konzentrationsmessung mit RGA

Die RGA misst alle 2 Sekunden die Gaskonzentrationen, welche kontinuierlich aufgezeichnet werden. Es wurden genügend Messwerte aufgezeichnet, um für den jeweils gemessenen Zustand eine statistisch ausreichende Menge für die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes zu erhalten. Die gemessenen Zeitintervalle pro Messpunkt liegen ungefähr zwischen 3 und 5 Minuten, abhängig von der Schwankungsbreite der Messung. Als Beispiel sind zwei Zeitbereiche für die Berechnung der Mittelwerte im Diagramm 4 grau unterlegt.

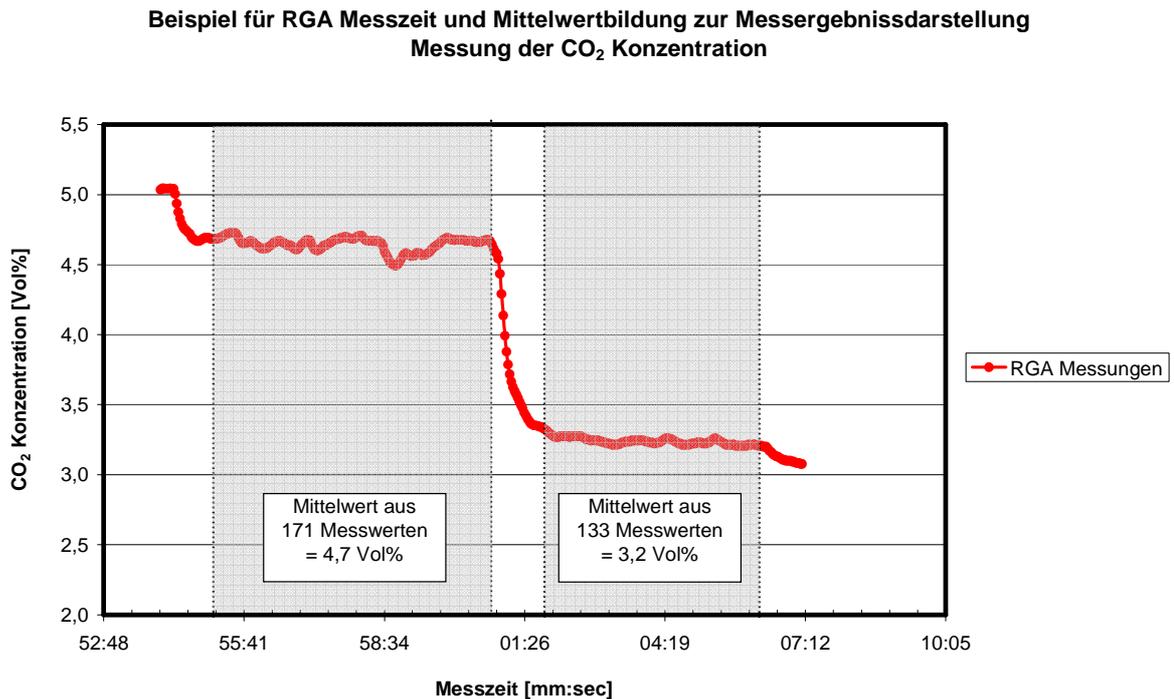


Diagramm 4: arithmetische Mittelwertbildung aus RGA-Messergebnissen

Der Hersteller dieser RGA-Einheit garantiert eine Abweichung des Messwertes von maximal 1% vom Messwert [17]. Alle RGA-Konzentrationswerte werden auf das trockene Gas bezogen.

7.5.2 Messgenauigkeit bei Konzentrationsmessung mit FTIR

Die FTIR misst alle 5 Sekunden Konzentrationswerte, welche kontinuierlich aufgezeichnet werden. Es wurden genügend Messwerte aufgezeichnet um für den jeweils gemessenen Zustand eine statistisch ausreichende Menge für die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes zu erhalten. Die gemessenen Zeitintervalle pro Messpunkt liegen ungefähr zwischen 3 und 5 Minuten, abhängig von der Schwankungsbreite der Messung. Als Beispiel sind zwei Zeitbereiche für die Berechnung der Mittelwerte im Diagramm 5 grau unterlegt.

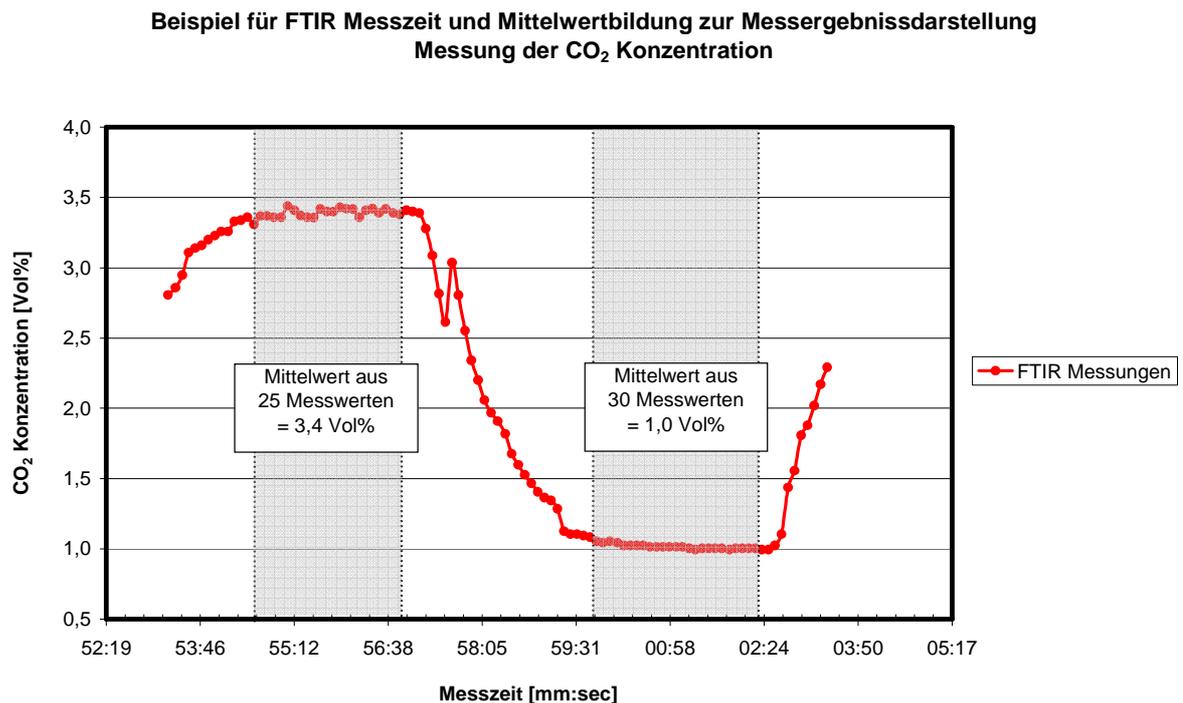


Diagramm 5: arithmetische Mittelwertbildung aus FTIR Messergebnissen

Zur Aufzeichnung der Messergebnisse werden die FTIR und die RGA gleich lange parallel betrieben. Da die RGA alle 2 Sekunden und die FTIR alle 5 Sekunden Werte aufzeichnet, liegen für die Mittelwertbildung aus den RGA-Messergebnissen immer 2,5-mal so viele Messergebnisse vor, wie für die FTIR. Somit ist die FTIR-Messdauer auch der limitierende Faktor für eine ausreichend lange Messzeit, um sinnvolle arithmetische Mittelwerte bilden zu können. Die Messwerte wurden in Echtzeit aufgezeichnet und angezeigt. Die Länge der Messzeit wurde für jeden Messpunkt individuell und manuell aufgrund der optischen Beurteilung der Messkurve gewählt.

Der Hersteller der FTIR-Messeinheit garantiert eine maximale Abweichung des Messwertes von 2 % [28]. Alle FTIR-Konzentrationswerte werden auf das trockene Gas bezogen.

7.5.3 Messgenauigkeit der Mass-Flow-Controller

Für die kalten Versuche und die Flammenversuche werden ausgewählte MFC benutzt. Bei Geräten der Standard-Bauweise ergibt sich die Messgenauigkeit aus der Abweichung vom Messwert. Bei high-performance-Geräten ergibt sich die Messgenauigkeit aus der Summe der Abweichung vom Endwert und der Abweichung vom Messwert. Der Endwert eines Gerätes ist der maximal mögliche Durchfluss.

Tabelle 12: Messgenauigkeit bei Volumenflussregelung mit MFC [27]

Gasart	MFC Bauweise	Maximaler Durchfluss	Dynamik	Abweichung vom Endwert	Abweichung vom Messwert
		[NL/min]	[-]	[%]	[%]
CH ₄	Standard	5	1:100		1,5
CO ₂	High performance	30	1:30	0,3	0,5
N ₂	High performance	50	1:30	0,3	0,5
Luft	High performance	100	1:30	0,3	0,5

Die maximale Abweichung des Volumenstroms wird nach Formel 9 berechnet. Für high-performance-Geräte werden die Abweichungen sowohl für den Endwert (maximaler Durchfluss) und den Messwert (bzw. Regelwert) verwendet. Für die Berechnung der Standard-Geräte wird nur der Messwert verwendet.

$$\dot{V}_{\text{Abweichung}} = \text{Messwert} \cdot \frac{\text{Messwertabweichung}}{100} + \text{Endwert} \cdot \frac{\text{Endwertabweichung}}{100}$$

Formel 9: Berechnung der maximalen MFC Volumenstromabweichung

Erläuterung: $\dot{V}_{\text{Abweichung}}$ [NL/min], Messwert [NL/min], Messabweichung [%], Endwert [NL/min], Endwertabweichung [%]

Die prozentuale Gesamtabweichung ergibt sich nach Formel 10.

$$\text{Gesamtabweichung} = \frac{\dot{V}_{\text{Abweichung}}}{\dot{V}_{\text{Messwert}}} \cdot 100$$

Formel 10: Berechnung der prozentualen MFC Gesamtabweichung

Erläuterung: Gesamtabweichung [%], $\dot{V}_{\text{Abweichung}}$ [NL/min], $\dot{V}_{\text{Messwert}}$ [NL/min]

7.5.4 Messgenauigkeit der Rotameter

Für die kalten Versuche und die Flammenversuche wurden Rotameter benutzt. Der Hersteller garantiert eine maximale Messabweichung von 2 % vom Messwert [29]. Die Rotameter wurden im Vorfeld der kalten Messungen und der Flammenmessungen mittels der MFC kalibriert. Über die MFC wurden die für die Versuche notwendigen Volumenströme eingeregelt und mit dem jeweiligen Rotameter gemessen. Deshalb wird für die maximale Messabweichung der Rotameter, die maximale Abweichung der zugehörigen MFC angenommen. Die

Rotameter wurden jeweils bei den kalten Versuchen und den Flammenversuchen für die Gasmischungsteilung des Hauptstranges auf das Verteilerrohr im Zentrum und den kleinen Verteilerring benutzt. Bei den Flammenversuchen wurde zusätzlich zum CH₄-MFC ein Rotameter benutzt, um einen Volumenstrom zu erzeugen, der über der Durchflussmenge des CH₄-MFC liegt.

7.5.5 Gesamte Messgenauigkeit für die Versuche in kalter Strömung

Bei unterschiedlichen Durchflüssen der MFC ergeben sich entsprechend der Messgenauigkeit der Geräte unterschiedliche Fehlerabweichungen. In Tabelle 13 werden einerseits die Abweichungen der einzelnen Durchflüsse für die MFC dargestellt und andererseits die maximale Abweichung für die CO₂- und O₂-Mischkonzentration. Die Abweichung für die Mischkonzentrationen ergibt sich aus dem Worst-Case Szenario der Volumenflüsse für die jeweilige Mischkonzentration. Dies soll anhand der maximalen positiven Messabweichung für die CO₂-Mischkonzentration beschrieben werden. Bei Auftreten des maximalen CO₂-MFC Durchflusses und der minimalen Durchflüsse für N₂ und Luft kommt es zur maximalen positiven Abweichung für die CO₂-Konzentration.

Tabelle 13: Messabweichungen der MFC im Detail bei kalten Versuchen

Messabweichungen der MFC für kalte Versuche								
Versuchsreihe	Volumenflüsse						Mischkonzentration	
Geschwindigkeit	CO ₂	Abweichung	N ₂	Abweichung	Luft	Abweichung	CO ₂ Abweichung	O ₂ Abweichung
[m/s]	[NI/min]	[%]	[NI/min]	[%]	[NI/min]	[%]	[%]	[%]
2,00	2,46	4,16	14,04	1,57	35,1	1,35	5,31	1,06
3,00	3,69	2,94	21,05	1,21	52,64	1,07	3,86	0,81
4,00	4,91	2,33	28,07	1,03	70,2	0,93	3,13	0,69

Basierend auf den Abweichungen der Mischkonzentrationen in Tabelle 13 und der Abweichung des RGA Messgerätes kann für die kalten Versuche die gesamte Messabweichung berechnet werden. Die gesamten Messabweichungen für die CO₂- und O₂-Konzentrationen werden in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 14: Gesamte Messabweichung für CO₂-Konzentration bei kalten Versuchen

Gesamte Messabweichung für CO ₂ Konzentrationsmessung bei kalten Versuchen			
Versuchsreihe	Abweichung vom Messwert		
Gasgeschwindigkeit	RGA Messung	MFC Gasmischung	Summe
[m/s]	[%]	[%]	[%]
2,00		5,31	6,31
3,00	1,00	3,86	4,86
4,00		3,13	4,13

Tabelle 15: Gesamte Messabweichung für O₂-Konzentration bei kalten Versuchen

Messabweichungen für O ₂ Konzentrationsmessung bei kalten Versuchen			
Versuchsreihe	Abweichung vom Messwert		
Gasgeschwindigkeit	RGA Messung	MFC Gasmischung	Summe
[m/s]	[%]	[%]	[%]
2,00		1,06	2,06
3,00	1,00	0,81	1,81
4,00		0,69	1,69

7.5.6 Gesamte Messgenauigkeit für die Flammenversuche

Bei unterschiedlichen Durchflüssen der MFC ergeben sich entsprechend der Messgenauigkeit der Geräte unterschiedliche Fehlerabweichungen. In Tabelle 16 werden einerseits die Abweichungen der einzelnen Durchflüsse für die MFC dargestellt und andererseits die maximale Abweichung für die CH₄- und O₂-Mischkonzentration. Die Abweichung für die Mischkonzentration ergibt sich aus dem Worst-Case Szenario der Volumenflüsse für die jeweilige Mischkonzentration. Dies soll anhand der maximalen positiven Messabweichung für die CH₄-Mischkonzentration beschrieben werden. Bei Auftreten des maximalen CH₄-MFC Durchflusses und der minimalen Durchflüsse für Luft kommt es zur maximalen positiven Abweichung für die CH₄-Konzentration.

Tabelle 16: Messabweichungen der MFC im Detail bei Flammenversuchen Teil 1

Erläuterung: Luft 1 entspricht der Vormischungsluft, Luft 2 entspricht der Luft für den großen Verteilerring

Messabweichungen der MFC für warme Versuche Teil 1										
Versuchsreihe	Volumenflüsse						Mischkonzentration			
	CH ₄	Abweichung	Luft 1	Abweichung	Luft 2	Abweichung	CH ₄	Abweichung	O ₂	Abweichung
Geschwindigkeit	[Nl/min]	[%]	[Nl/min]	[%]	[Nl/min]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
2,00	3,43	3,12	13,06	1,65	35,90	1,34	2,73		0,19	
3,00	5,15	2,25	19,59	1,27	53,90	1,06	2,44		0,17	
4,00	6,86	1,81	26,13	1,07	71,85	0,92	2,30		0,16	

Für die Berechnung der CO₂- und H₂O-Messabweichungen muss man die auftretende Verbrennungsreaktion berücksichtigen. Die Hauptreaktion bei der vollständigen Verbrennung

von CH₄ mit Luft, ist die Reaktionen, bei welcher die Gasspezies CO₂ und H₂O gebildet werden.

Man erkennt, dass nur die CH₄-Menge ausschlaggebend ist für die maximalen oder minimalen entstehenden CO₂- und H₂O-Mengen. Für die Berechnung der Fehlerabweichung aufgrund der Volumenflussregelung bedeutet dies folgendes: Bei einer maximalen positiven Volumenflussabweichung für CH₄ und einer maximalen negativen Volumenflussabweichung für Luft treten die maximalen positiven Konzentrationsabweichungen für CO₂ und H₂O auf. Die Ergebnisse für die CO₂- und H₂O-Mischkonzentrationsabweichungen bei einer vollständigen Verbrennung sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Messabweichungen der MFC im Detail bei Flammenversuchen Teil 2

Erläuterung: Luft 1 entspricht der Vormischungsluft, Luft 2 entspricht der Luft für den großen Verteilerring

Messabweichungen der MFC für warme Versuche Teil 2								
Versuchsreihe	Volumenflüsse						Mischkonzentration	
Geschwindigkeit	CH ₄	Abweichung	Luft 1	Abweichung	Luft 2	Abweichung	CO ₂	H ₂ O
[m/s]	[Nl/min]	[%]	[Nl/min]	[%]	[Nl/min]	[%]	[%]	[%]
2,00	3,43	3,12	13,06	1,65	35,90	1,34	2,73	2,73
3,00	5,15	2,25	19,59	1,27	53,90	1,06	2,44	2,44
4,00	6,86	1,81	26,13	1,07	71,85	0,92	2,30	2,30

Basierend auf den Abweichungen der Mischkonzentrationen in Tabelle 16, Tabelle 17 und den Fehlerabweichungen der FTIR- und RGA-Messgeräte kann für die Flammenversuche die gesamte Messabweichung berechnet werden. Die gesamten Messabweichungen für die CH₄-, O₂-, CO₂- und H₂O-Konzentrationen werden in Tabelle 18, Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 18: Gesamte Messabweichung für CH₄-Konzentration bei Flammenversuchen

Erläuterung: CH₄ Spezieskonzentrationsmessung nur mit FTIR möglich

Gesamte Messabweichung für CH ₄ Konzentrationsmessung bei warmen Versuchen					
Versuchsreihe	Abweichung vom Messwert				
Gasgeschwindigkeit	RGA Messung	FTIR Messung	MFC Gasmischung	RGA Summe	FTIR Summe
[m/s]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
2,00			2,73		4,73
3,00		2,00	2,44		4,44
4,00			2,30		4,30

Tabelle 19: Gesamte Messabweichung für O₂-Konzentration bei Flammenversuchen

Erläuterung: O₂ Spezieskonzentrationsmessung nur mit RGA möglich

Gesamte Messabweichung für O ₂ Konzentrationsmessung bei warmen Versuchen					
Versuchsreihe	Abweichung vom Messwert				
Gasgeschwindigkeit [m/s]	RGA Messung [%]	FTIR Messung [%]	MFC Gasmischung [%]	RGA Summe [%]	FTIR Summe [%]
2,00			0,19	0,19	
3,00	1,00		0,17	0,17	
4,00			0,16	0,16	

Tabelle 20: Gesamte Messabweichung für CO₂-Konzentration bei Flammenversuchen

Erläuterung: CO₂ Spezieskonzentrationsmessung mit RGA und FTIR möglich

Gesamte Messabweichung für CO ₂ Konzentrationsmessung bei warmen Versuchen					
Versuchsreihe	Abweichung vom Messwert				
Gasgeschwindigkeit [m/s]	RGA Messung [%]	FTIR Messung [%]	MFC Gasmischung [%]	RGA Summe [%]	FTIR Summe [%]
2,00			2,73	2,73	4,73
3,00	1,00	2,00	2,44	2,44	4,44
4,00			2,30	2,30	4,30

Tabelle 21: Gesamte Messabweichung für H₂O-Konzentration bei Flammenversuchen

Erläuterung: H₂O Spezieskonzentrationsmessung nur mit FTIR möglich

Gesamte Messabweichung für H ₂ O Konzentrationsmessung bei warmen Versuchen					
Versuchsreihe	Abweichung vom Messwert				
Gasgeschwindigkeit [m/s]	RGA Messung [%]	FTIR Messung [%]	MFC Gasmischung [%]	RGA Summe [%]	FTIR Summe [%]
2,00			2,73		4,73
3,00		2,00	2,44		4,44
4,00			2,30		4,30

8 Ergebnisse und Diskussion für Messungen in kalten Strömungen ohne chemische Reaktionen

In diesem Kapitel werden für die kalten Messungen die Parametervariationen und die Messergebnisse der kalten Konzentrationsmessungen dargestellt, analysiert und anschließend diskutiert.

8.1 Versuchsparameter für die Konzentrationsmessungen in kalten Strömungen

Für die kalten Versuche wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Die Volumenströme wurden so gewählt, dass sich drei unterschiedliche Einströmgeschwindigkeiten des Gasgemisches in den Messraum ergeben. In Kapitel 7.3 wird die Parameterwahl für die kalten Versuche näher beschrieben.

Die Versuchsparameter für alle drei kalten Versuche werden in Tabelle 22, Tabelle 23 und Tabelle 24 dargestellt. Aufgrund der eingestellten Volumenflüsse ergeben sich bei Normbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K) drei unterschiedliche Gasaustrittsgeschwindigkeiten von 2, 3 und 4 m/s. Die zugehörigen Luftströme treten mit den Geschwindigkeiten 2,48 m/s, 3,72 m/s und 4,97 m/s in den Messraum ein.

Als Tracergas für die Konzentrationsmessungen wurde CO₂ verwendet. Aufgrund der verwendeten Gas- und Luftströme liegt auch die O₂-Konzentration in einem messbaren Konzentrationsbereich und wurde ebenfalls gemessen. Diese kann zusätzlich für die Verifikation der Messergebnisse von CO₂ herangezogen werden.

Tabelle 22: Versuchsparameter für kalte Strömung mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s

Gasgemisch = 16,50 NI/min	
CO ₂ Volumenstrom	2,46 [NI/min]
N ₂ Volumenstrom	14,04 [NI/min]
CO ₂ Volumenanteil	14,91 [Vol%]
N ₂ Volumenanteil	85,09 [Vol%]
Luft = 35,10 NI/min	
Volumenstrom	35,1 [NI/min]
Luft Volumenanteil	100,00 [Vol%]
Normbedingungen	
Druck	1,01325 [bar]
Temperatur	273,15 [K]
Strömungsgeschwindigkeiten bei Normbedingungen	
Gasgemisch	2,00 [m/s]
Luft	2,48 [m/s]

Tabelle 23: Versuchsparameter für kalte Strömung mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s

Gasgemisch = 24,74 NI/min	
CO ₂ Volumenstrom	3,69 [NI/min]
N ₂ Volumenstrom	21,05 [NI/min]
CO ₂ Volumenanteil	14,92 [Vol%]
N ₂ Volumenanteil	85,08 [Vol%]
Luft = 52,64 NI/min	
Volumenstrom	52,64 [NI/min]
Luft Volumenanteil	100,00 [Vol%]
Normbedingungen	
Druck	1,01325 [bar]
Temperatur	273,15 [K]
Strömungsgeschwindigkeiten bei Normbedingungen	
Gasgemisch	3,00 [m/s]
Luft	3,72 [m/s]

Tabelle 24: Versuchsparameter für kalte Strömung mit $v_{\text{Gas}}=4$ m/s

Gasgemisch = 32,99 NI/min	
CO ₂ Volumenstrom	4,91 [NI/min]
N ₂ Volumenstrom	28,07 [NI/min]
CO ₂ Volumenanteil	14,89 [Vol%]
N ₂ Volumenanteil	85,11 [Vol%]
Luft = 70,20 NI/min	
Volumenstrom	70,20 [NI/min]
Luft Volumenanteil	100,00 [Vol%]
Normbedingungen	
Druck	1,01325 [bar]
Temperatur	273,15 [K]
Strömungsgeschwindigkeiten bei Normbedingungen	
Gasgemisch	4,00 [m/s]
Luft	4,97 [m/s]

8.2 Ergebnisse der Konzentrationsmessungen in kalten Strömungen

Für die Messung der CO₂- und O₂-Konzentrationen in der kalten Strömung wurde die RGA verwendet. Die O₂ kann nur mittels der RGA gemessen werden und für die CO₂ Konzentration liefert die RGA ein genaueres Messergebnis als die FTIR (siehe Kapitel 7.5.2).

Es wurden in drei unterschiedlichen Messhöhen über den Verteilerrohren Konzentrationsprofile vermessen. Pos 5 bzw. Abstand=0 mm markiert jeweils den Messpunkt auf der Achse des Verteilerrohres im Zentrum. Bei einer symmetrischen Strömungssituation sind die Messwerte links und rechts von dieser Position als spiegelbildlich zu sehen. Zur Prüfung der Strömungssymmetrie wurden bei jeder Versuchsreihe jeweils auf einer Messhöhe die Messungen über einen größeren Achsabstandsbereich durchgeführt. Die Messergebnisse zeigen eine Strömungssymmetrie um das Achszentrum. Schlussfolgernd können die Messkurven in den anderen Messhöhen, ebenfalls näherungsweise als radialsymmetrisch angenommen werden.

Die Plausibilität der Messergebnisse kann mittels einer Bilanzierung über die vollständige Vermischungskonzentration geprüft werden. Wenn sich alle eingeregelter Gas- und Luftströme vollständig vermischen, stellt sich nach einer bestimmten Strömungsstrecke eine konstante Mischkonzentration im Reaktor ein. Diese Mischkonzentration kann auch berechnet werden und mit den Messwerten aus der obersten Messhöhe verglichen werden. Die am Ende von Tabelle 25, Tabelle 26 und Tabelle 27 dargestellten Mischkonzentrationen für CO₂ und O₂ bei vollständiger Vermischung wurden nach Formel 11 berechnet.

Tabelle 26: Messwerte der CO₂- und O₂-Konzentrationen der Versuchsreihe in kalter Strömung mit v_{Gas}=3m/s

Gasgeschwindigkeit = 3,00m/s Luftgeschwindigkeit = 3,72m/s											
	Pos11	Pos10	Pos9	Pos8	Pos7	Pos6	Pos5	Pos4	Pos3	Pos2	Pos1
	Abstand [mm]										
	-37,5	-31,25	-25	-18,75	-12,5	-6,25	0	6,25	12,5	18,75	25
Messhöhe = 15mm											
CO ₂ _{RG} [Vol%]	4,66		4,33	4,78	5,66	9,03	12,61				
O ₂ _{RG} [Vol%]	14,30		15,00	14,30	12,70	8,20	3,40				
Messhöhe = 95mm											
CO ₂ _{RG} [Vol%]	4,31		3,95	4,33	5,33	6,41	7,55				
O ₂ _{RG} [Vol%]	14,90		15,50	15,00	13,50	11,70	10,35				
Messhöhe = 205mm											
CO ₂ _{RG} [Vol%]	4,70		4,58	4,60	5,31	5,51	5,40	5,59	5,31	4,86	4,68
O ₂ _{RG} [Vol%]	14,50		14,50	14,60	13,40	13,20	13,25	13,00	13,40	14,10	14,40
Mischkonzentration = 100% Vermischung von Luft mit Gas											
Soll CO ₂ _{RG} [Vol%]	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77
Soll O ₂ _{RG} [Vol%]	14,28	14,28	14,28	14,28	14,28	14,28	14,28	14,28	14,28	14,28	14,28

Tabelle 27: Messwerte der CO₂- und O₂-Konzentrationen der Versuchsreihe in kalter Strömung mit v_{Gas}=4m/s

Gasgeschwindigkeit = 4,00m/s Luftgeschwindigkeit = 4,97m/s											
	Pos11	Pos10	Pos9	Pos8	Pos7	Pos6	Pos5	Pos4	Pos3	Pos2	Pos1
	Abstand [mm]										
	-37,5	-31,25	-25	-18,75	-12,5	-6,25	0	6,25	12,5	18,75	25
Messhöhe = 15mm											
CO ₂ _{RG} [Vol%]	4,74		4,39	4,57	5,29	5,79	12,50	6,09			
O ₂ _{RG} [Vol%]	14,20		14,90	14,60	13,20	12,70	3,50	12,40			
Messhöhe = 95mm											
CO ₂ _{RG} [Vol%]	4,30		4,10	4,28	5,56	6,63	7,82				
O ₂ _{RG} [Vol%]	15,10		15,30	15,00	13,50	11,30	10,10				
Messhöhe = 205mm											
CO ₂ _{RG} [Vol%]	4,64		4,65	4,65	4,84	5,10	5,41	5,40	5,26	4,96	4,76
O ₂ _{RG} [Vol%]	14,30		14,40	14,40	14,10	13,50	13,30	13,20	13,80	14,10	14,30
Mischkonzentration = 100% Vermischung von Luft mit Gas											
Soll CO ₂ _{RG} [Vol%]	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76
Soll O ₂ _{RG} [Vol%]	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29	14,29

Auf Basis dieser Konzentrationswerte werden die nachfolgenden Konzentrationsdiagramme von Diagramm 6 bis Diagramm 11 erstellt. Alle dargestellten Konzentrationsdiagramme der CO₂- und O₂-Konzentrationen in diesem Kapitel sind identisch aufgebaut.

Die nachfolgenden CO₂-Konzentrationsdiagramme der kalten Versuche zeigen, dass die Konzentrationsprofile nach dem Eintritt in den Reaktor auf einer Höhe von 15mm ein ausgeprägtes Glockenprofil aufweisen. Aufgrund der Durchmischung des Gasgemischstroms mit dem Luftstrom kommt es zum Abflachen des Konzentrationsprofils über die Höhe. Man erkennt aufgrund der ähnlichen Spezieseingangskonzentrationen, dass alle Profile unabhängig von der Strömungseintrittsgeschwindigkeit einerseits eine sehr ähnliche Profilform aufweisen

und andererseits ähnliche Konzentrationswerte besitzen. Das Gasgemisch tritt mit einer vorgegebenen CO₂-Konzentration von 14,9 Vol% in den Reaktor ein. Die CO₂-Konzentrationspitze im Messzentrum nimmt in allen drei Fällen über die Messhöhe von ca. 12,5 Vol% über ca. 7,5 Vol% auf bis zu ca. 5,5 Vol% ab. Die CO₂-Konzentrationsabnahme von 14,9 Vol% beim Gaseintritt auf die CO₂ Konzentration von ca. 12,5 Vol% in einer Messhöhe von 15mm bei allen drei Geschwindigkeiten bedarf einer genaueren Analyse in Kapitel 8.3.

Man erkennt, dass im Mischungsbereich zwischen den Gasverteilerrohren bei einem Achsabstand von -12,5 mm die unterschiedlichen Gasgeschwindigkeiten den größten Einfluss auf die Konzentrationsprofile haben. In der Messhöhe 95mm über den Verteilerrohren weist das Profil mit der Gasgeschwindigkeit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s eine CO₂ Konzentration von 6,3Vol% auf, wohingegen die Profile für die höheren Gasgeschwindigkeiten bereits auf einen Konzentrationswert von ca. 4,7Vol% vermischt sind. Eine detaillierte Analyse bezüglich des Mischungsfortschritts wird in Kapitel 8.3 mittels des Mischungsgrades durchgeführt.

In der Messhöhe 205mm über den Austrittsrohren liegt für alle Geschwindigkeitsvarianten keine vollkommene Vermischung vor. Die blauen Messkurven weisen in allen drei Fällen ein abgeflachtes, glockenförmiges Konzentrationsprofil auf. Weiteres stellt sich in allen drei Fällen eine zu geringe Gesamtmischkonzentration verglichen mit der berechneten Gesamtmischkonzentration ein.

Die Annahme der Rotationssymmetrie der Strömung über die Achsmitte in Kapitel 7.4 wird mit den gemessenen Konzentrationsprofilen bestätigt. Man erkennt für die Messung mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s die Symmetrie in der Messhöhe 15 mm sowie bei den Messungen mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s und $v_{\text{Gas}}=4$ m/s die spiegelbildlichen Messwerte in der Höhe von 205 mm.

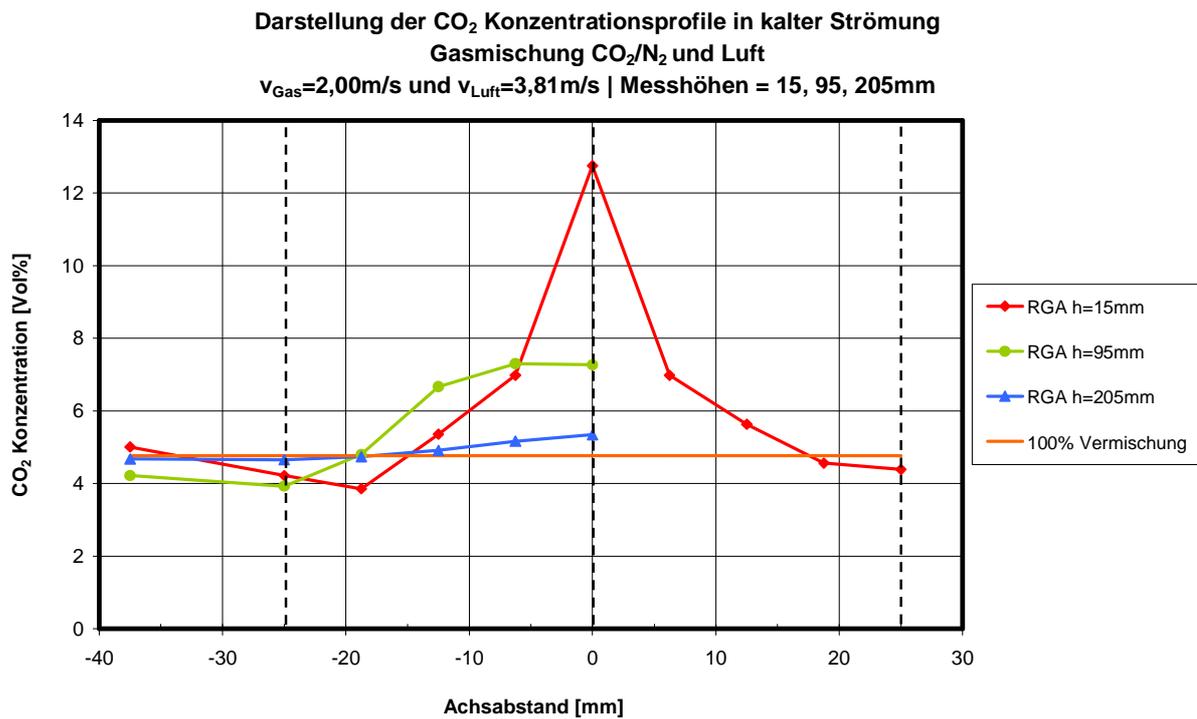


Diagramm 6: CO₂-Konzentration über den Achsabstand in kalter Strömung mit v_{Gas}=2m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

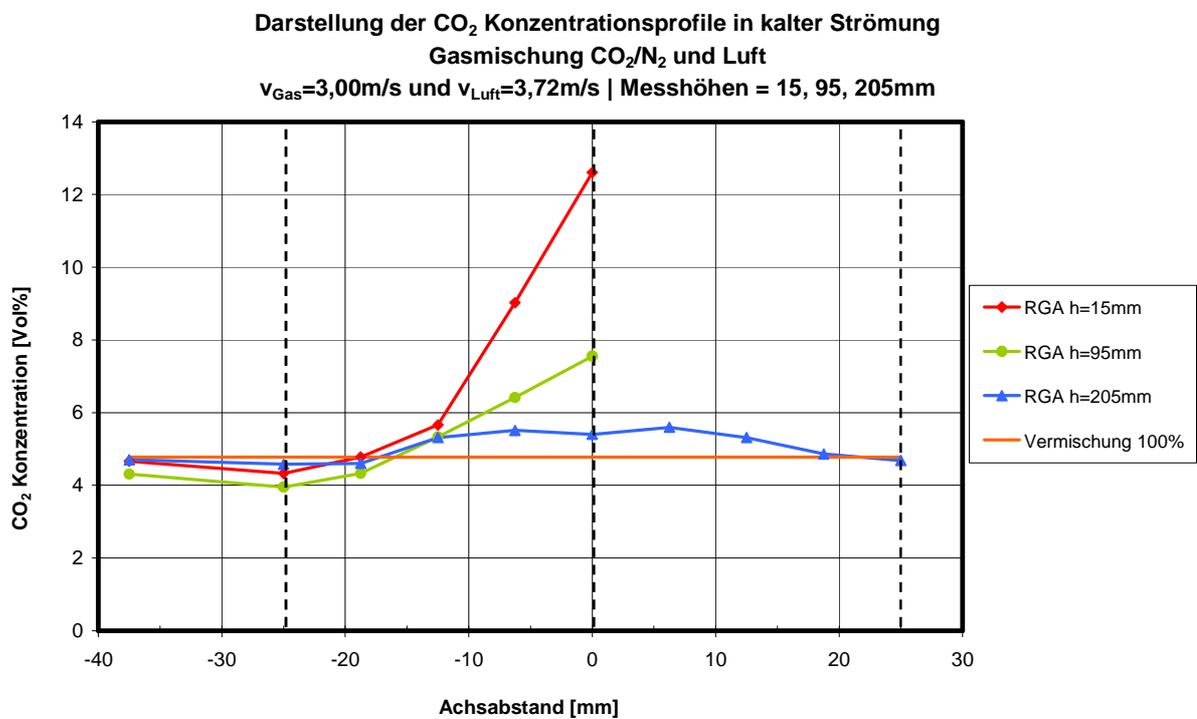


Diagramm 7: CO₂-Konzentration über den Achsabstand in kalter Strömung mit v_{Gas}=3m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

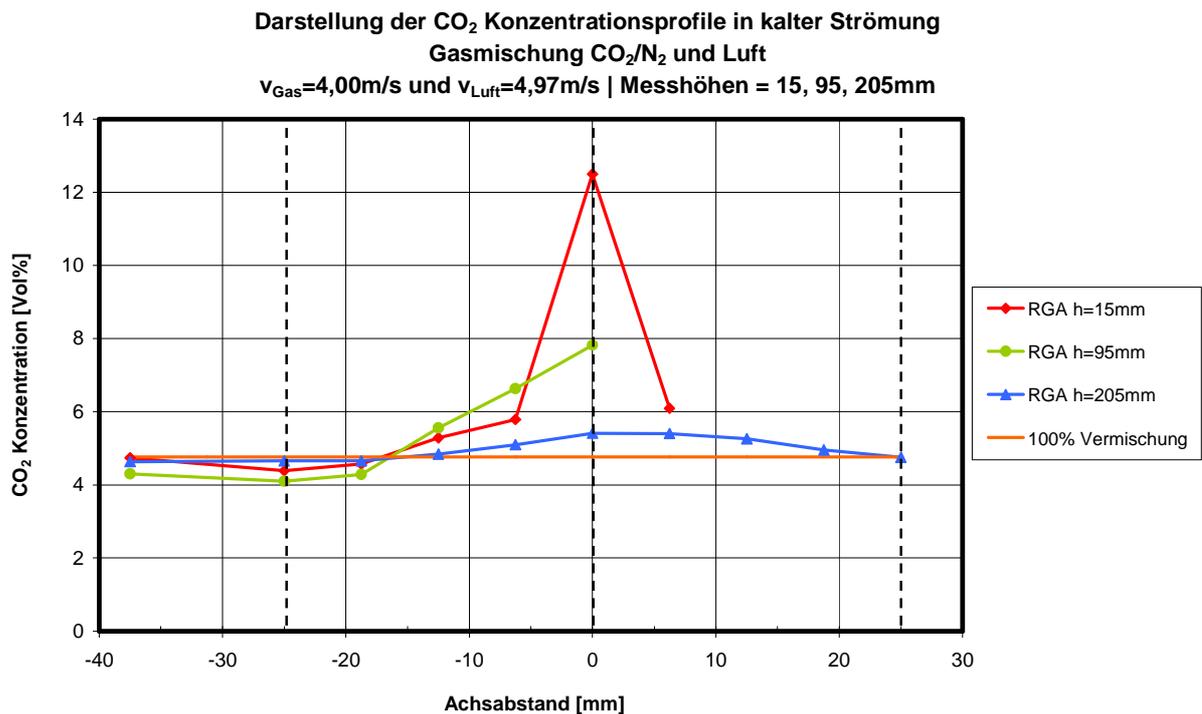


Diagramm 8: CO₂-Konzentration über den Achsabstand in kalter Strömung mit v_{Gas}=4m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

Die nachfolgenden O₂-Konzentrationsdiagramme (Diagramm 9, Diagramm 10 und Diagramm 11) der kalten Versuche zeigen inverse Profilformen im Vergleich mit den Messergebnissen der CO₂ Messungen.

Um diese Messergebnisse besser zu verstehen, bedarf es der Betrachtung des Gasmisch- und Lufteintritts in den Reaktor. Über die Verteilerrohre im Zentrum und am kleinen Verteilerkreis (siehe senkrecht, gestrichelte Linien) tritt das Gasmischstrom aus CO₂ und N₂ ein. Über den äußeren Verteilerring wird ein Luftstrom in den Reaktor eingebracht. Die Einlassöffnungen für den Luftstrom liegen auf den Achsabständen -50 mm und 50 mm, welche außerhalb des Darstellungsbereichs liegen. Alle drei O₂ Konzentrationsmessungen der kalten Versuchsreihen zeigen eine O₂-Konzentration, welche 15mm über dem Verteilerrohr im Zentrum gemessen wurde.

Die Annahme der rotationssymmetrischen Strömung wird auch von den O₂ Konzentrationsprofilen bestätigt.

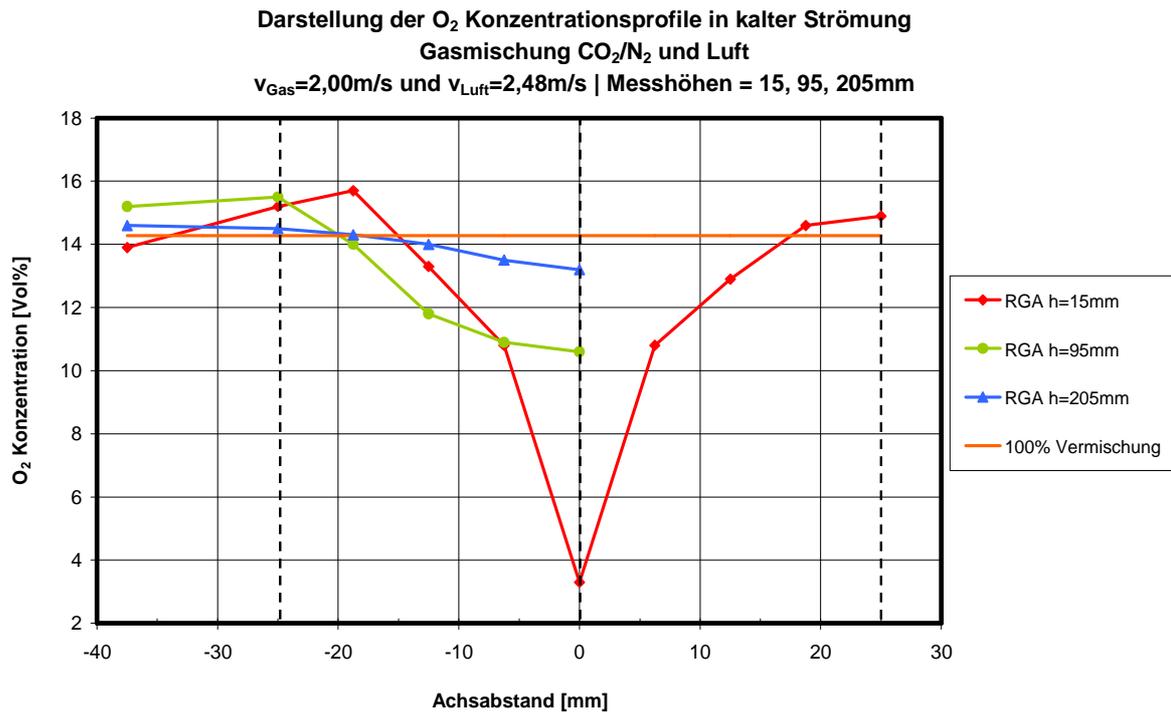


Diagramm 9: O₂-Konzentration über den Achsabstand in kalter Strömung mit v_{Gas}=2m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

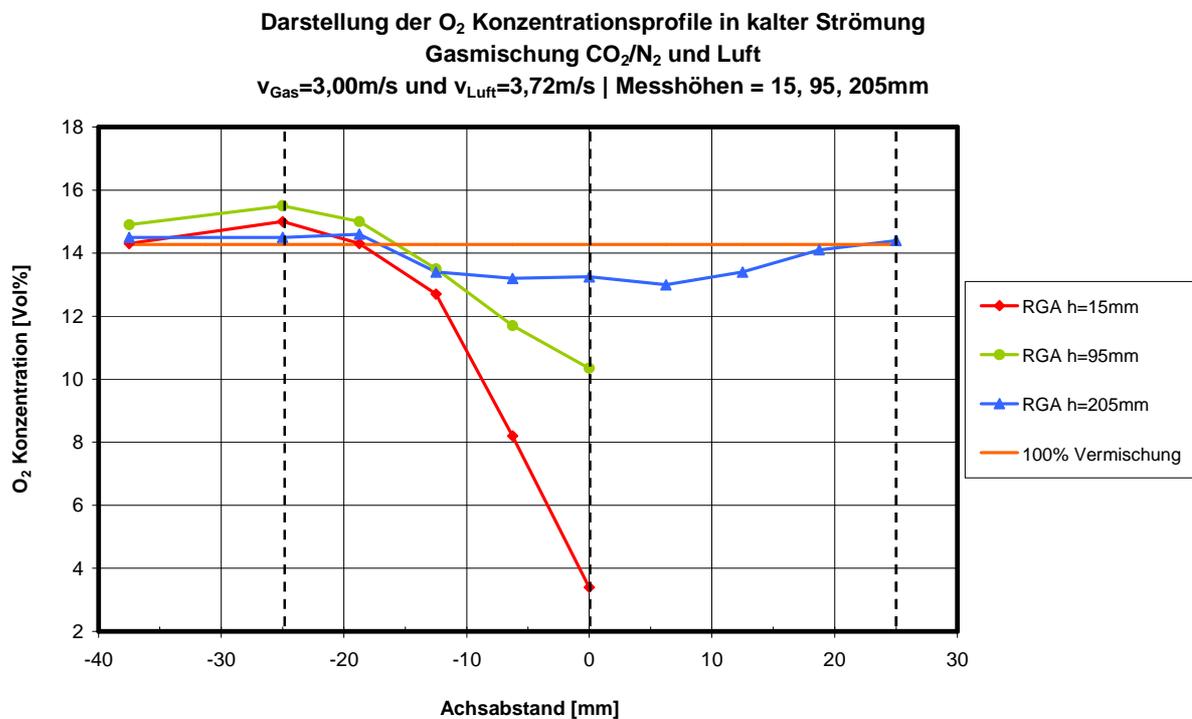


Diagramm 10: O₂-Konzentration über den Achsabstand in kalten Strömung mit v_{Gas}=3m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

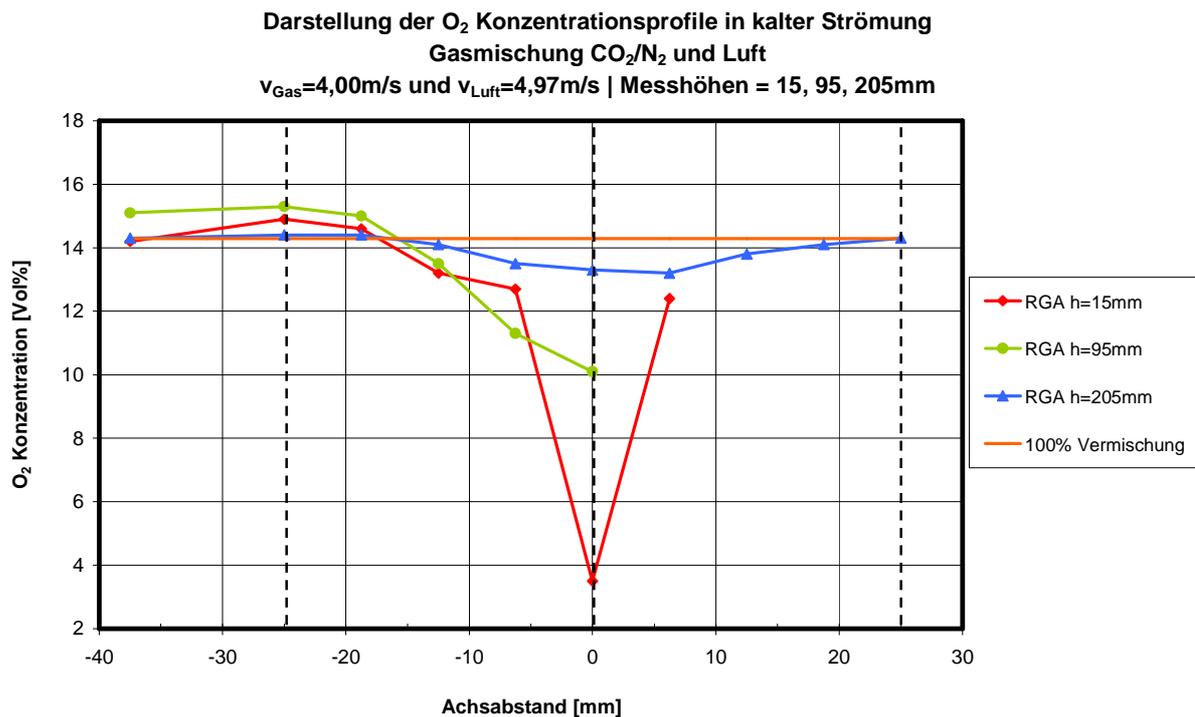


Diagramm 11: O₂-Konzentration über den Achsabstand in kalten Strömung mit v_{Gas}=4m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

8.3 Diskussion der Messergebnisse in kalten Strömungen

Die Messergebnisse zeigen, dass die Gas- und Lufttrittsgeschwindigkeiten keinen relevanten Einfluss auf den Mischungsfortschritt in einer Höhe 205 mm über den Gas- und Luftverteilerrohren haben. In der höchsten Messhöhe 205 mm weisen alle CO₂-Konzentrationsprofile ein ähnliche Profilausprägung auf (siehe Diagramm 13).

Um die kalten Messergebnisse zu evaluieren werden die gemessenen CO₂- und O₂-Spezieskonzentrationen gegenübergestellt. Die gemessenen CO₂- und O₂-Konzentrationsprofile sind miteinander gekoppelt. CO₂ vermischt sich vom Achszentrum rotationssymmetrisch nach außen und O₂ rotationssymmetrisch von außen in Richtung Achsmitte. Um die Korrelation der Messergebnisse zu untersuchen, werden die CO₂ und O₂ Messergebnisse gegenübergestellt. Der Gasstrom strömt mit einer CO₂-Konzentration von 14,91 Vol% und einer O₂-Konzentration von 0 Vol% aus den Verteilerrohren in die Reaktorkammer. Der Luftstrom tritt mit einer O₂ Konzentration von 20,94 Vol% und einer CO₂ Konzentration von 0 Vol% in die Reaktorkammer ein. Mittels der gegebenen Randbedingungen P1(0 O₂-Vol% /14,91 CO₂-Vol%) und P2(20,94 O₂-Vol%/0 CO₂-Vol%) erhält man die Geradengleichung für die Misch-

korrelation zwischen den Konzentrationen von CO_2 und O_2 . Die Gleichung wird in Formel 12 dargestellt.

$$c_{\text{CO}_2} = -0,712 \cdot c_{\text{O}_2} + 14,91$$

Formel 12: Geradengleichung für die Mischkorrelation zwischen CO_2 - und O_2 Konzentrationen für die kalten Messungen

Erläuterung: c_{CO_2} ... gemessene CO_2 Konzentration, c_{O_2} ... gemessene O_2 Konzentration

Die Ergebnisse dieser Korrelationen zwischen CO_2 - und O_2 -Konzentrationen für die kalten Versuchsreihen mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s, $v_{\text{Gas}}=3$ m/s und $v_{\text{Gas}}=4$ m/s werden im Diagramm 12 dargestellt. Man erkennt, dass die Messwerte aller Geschwindigkeitsvarianten der kalten Versuchsreihen mit der berechneten Geraden für die Mischkorrelation sehr gut übereinstimmen. Daraus lassen sich die Schlussfolgerungen ziehen, dass die Messergebnisse der O_2 - und CO_2 -Messungen über eine Gerade miteinander gekoppelt sind, und da alle Messpunkte mit der Geraden für die Mischkorrelation zusammenfallen, können auch Messfehler aufgrund von Falschlufte ausgeschlossen werden.

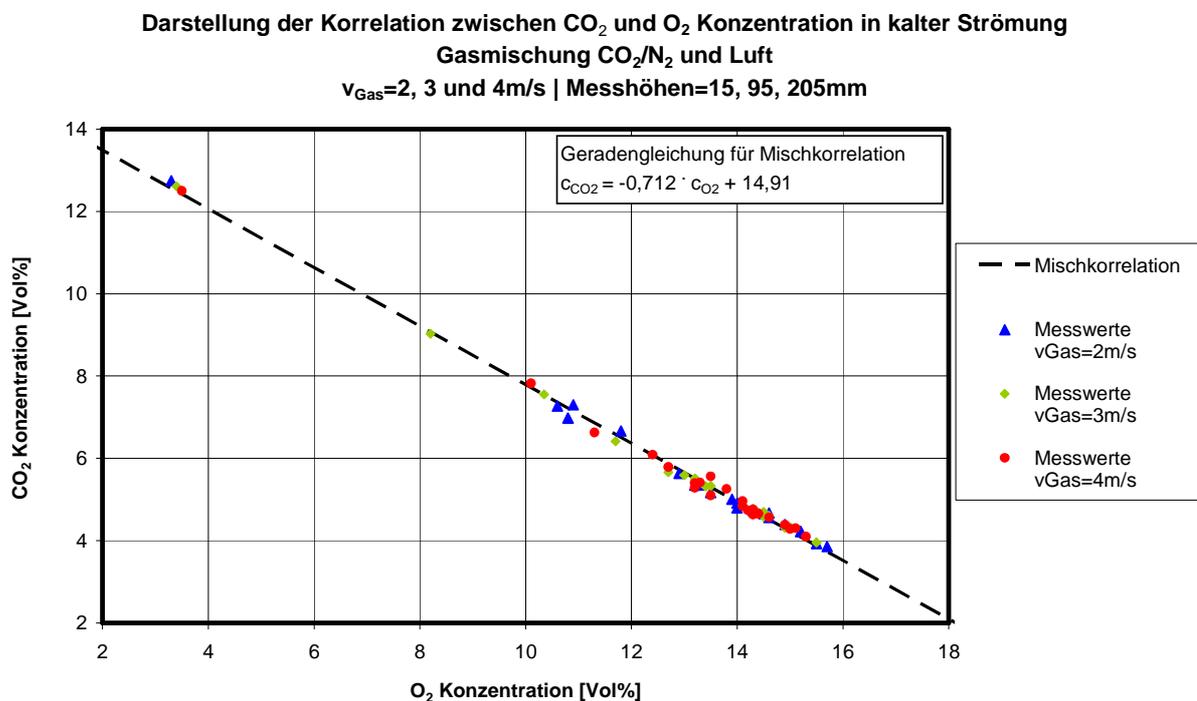


Diagramm 12: Korrelation zwischen CO_2 - und O_2 -Konzentrationen aller Messwerte in kalter Strömung

Die Plausibilität der Messergebnisse wurde weiteres mittels einer Bilanzierung aller Eingangs- und Ausgangsströme in den Reaktor überprüft. Die Gas- und Lufteingangsströme wurden mittels der MFC und bekannten Fehlerabweichungen eingestellt. Aus diesen Eingangsströmen kann für die vollständige Vermischung eine theoretische CO_2 - und O_2 -Mischkonzentration für den Ausgangstrom berechnet werden. Diese berechneten Mischkonzentrationen werden den gemessenen Mischkonzentrationen gegenübergestellt. Die Messergebnisse werden in Diagramm 13 und Diagramm 14 dargestellt.

Für die Messergebnisse aller drei Geschwindigkeitsvarianten liegen in der Messhöhe 205 mm fast vollständige CO_2 - und O_2 -Mischkonzentrationen vor. Innerhalb des Achsabstands von 25 mm bestehen für alle Geschwindigkeitsvarianten noch CO_2 - und O_2 -Glockenprofile, welche im Extremwert für CO_2 ca. 15 % und für O_2 ca. 8% von der vollständigen Vermischung abweichen. Da die CO_2 - und O_2 -Gasspezies innerhalb der Glockenkurven noch nicht über den gesamten Querschnitt vermischt sind, kommt es für CO_2 -Konzentrationen im Randbereich zu einer Unterschreitung und für O_2 -Konzentrationen zu einer Überschreitung der Vermischungsgeraden für vollständige Vermischung.

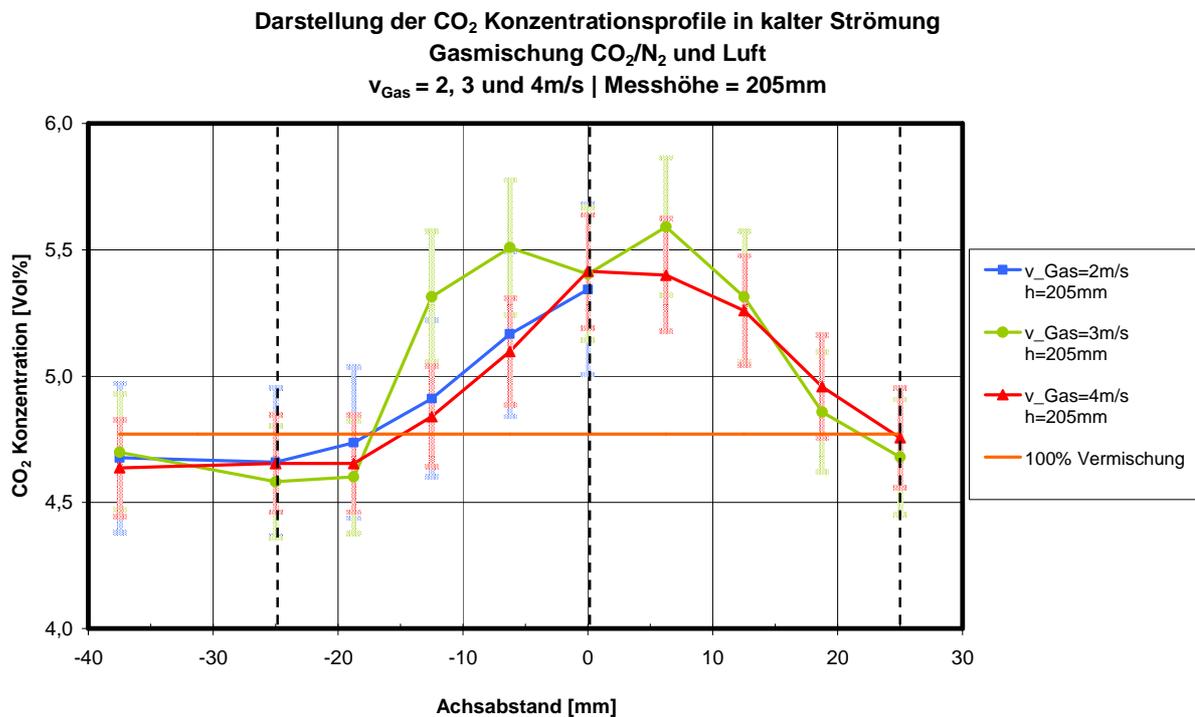


Diagramm 13: CO_2 -Konzentrationen mit Messfehlertoleranz in Messhöhe=205mm in kalten Strömungen für alle Geschwindigkeitsvarianten

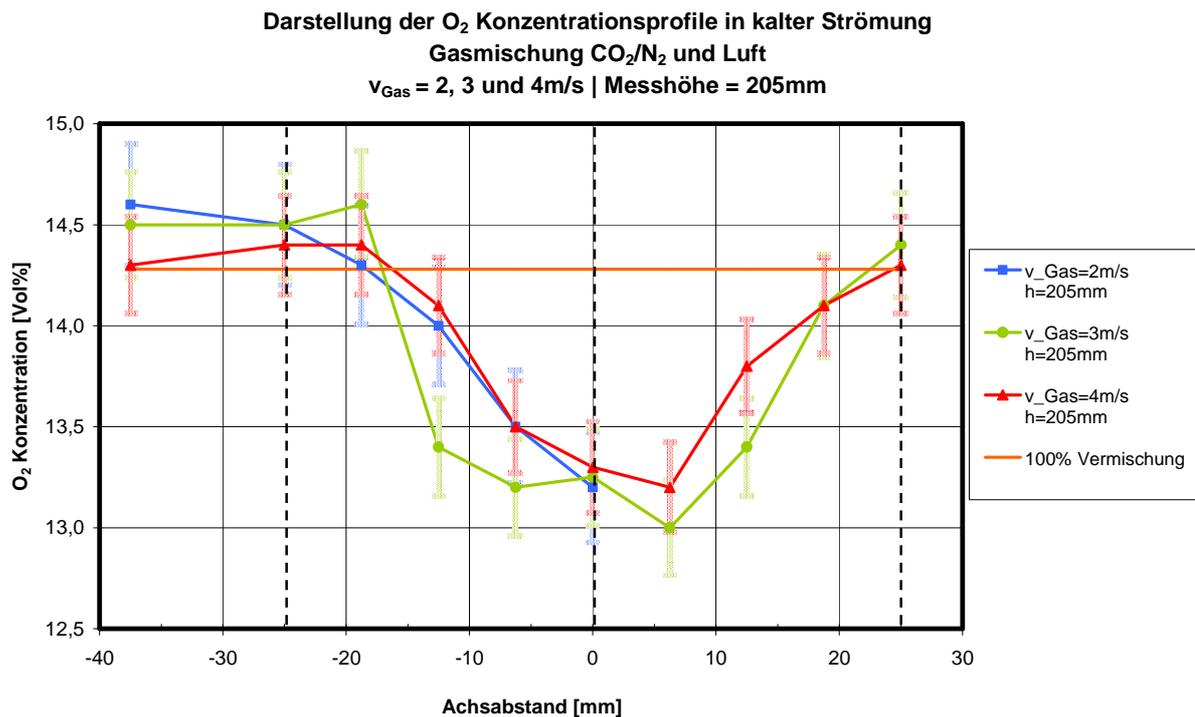


Diagramm 14: O₂-Konzentrationen mit Messfehlertoleranz in Messhöhe=205mm in kalten Strömungen für alle Geschwindigkeitsvarianten

Um die, über den gesamten Messkammerquerschnitt gemittelte, CO₂- und O₂-Vermischungskonzentration aus den Messdaten der Höhe 205 mm zu berechnen, wurden Vereinfachungen getroffen. In der Messhöhe 205 mm wurden die Geschwindigkeitsgradienten über den gesamten Messkammerquerschnitt vernachlässigt. Es wurde angenommen dass außerhalb des Achsabstandes von 37,5 mm keine Konzentrationsänderung mehr auftritt. Die Messwerte der Messhöhe 205 mm wurden unter den beschriebenen Rahmenbedingungen durch Konzentrationswerte über den gesamten Messkammerquerschnitt mit einem Durchmesser von 150mm ergänzt. Die Konzentrationswerte werden nach den zugehörigen Strömungsflächen gewichtet und arithmetisch nach Formel 13 gemittelt. Das bedeutet, der Konzentrationswert im Zentrum wird auf eine Kreisfläche mit dem Radius 3,1 mm bezogen. Jedem Konzentrationswert auf dem negativen Achsabstand wird eine Ringkreisfläche zugerechnet. Der Innen- und Außenradius dieser Ringkreisflächen ergeben sich über den Abstand von +/- 3,1 mm zu jedem zugeordneten Achsabstand eines Messwertes.

$$\bar{c} = \frac{c_1 \cdot A_1 + c_2 \cdot A_2 + \dots + c_i \cdot A_i}{A_{gesamt}}$$

Formel 13: Konzentrationsmittelwertbildung für vollständige Vermischung in kalter Strömung ohne Geschwindigkeitsgradienten

Erläuterung: \bar{c} ... Spezieskonzentrationsmittelwert, c_1 bis c_i ... gemessene Spezieskonzentrationen, A_1 bis A_i ... berechnete Flächen senkrecht zur Strömungsrichtung

Die Ergebnisse der Mischkonzentrationsberechnungen sind in Tabelle 29 dargestellt und bezüglich der Messgenauigkeit analysiert. Man erkennt, dass alle Mischkonzentrationen, welche aus den Messwerten berechnet wurden, innerhalb der Messtoleranz liegen.

Tabelle 28: CO₂- und O₂-Mischkonzentrationen für vollständige Vermischung in Messhöhe 205 mm aus Messwerten berechnet für kalte Strömungen

CO ₂ - und O ₂ -Mischkonzentrationen aus Messwerten in kalter Strömung					
Veruchsparmter		vollständige Vermischung		Abweichung vom Messwert	
Geschwindigkeit	Gasspezies	Messerte	Soll	Messtoleranz	Ist
[ms]	[-]	[Vol%]	[Vol%]	[%]	[%]
2	CO ₂	4,66	4,77	5,31	-2,28
	O ₂	14,38	14,28	1,06	0,67
3	CO ₂	4,70	4,77	3,86	-1,44
	O ₂	14,37	14,28	0,81	0,61
4	CO ₂	4,65	4,76	3,13	-2,28
	O ₂	14,29	14,29	0,69	0,01

Insgesamt zeigen die Analysen der Messwerte in den Diagrammen Diagramm 12 bis Diagramm 14, sowie in der Tabelle 28, dass die Massenbilanzen über die Messkammer geschlossen sind. Dies bedeutet, dass kein relevanter Falschlufstrom in die Messkammer eintritt und keine Fehlmessungen aufgrund der Regel- und Messinstrumente vorliegen. Alle Messergebnisse, welche bezüglich der Messtoleranz untersucht werden konnten, wurden analysiert und liegen innerhalb der vorgegebenen Toleranzen.

Die Berechnung der Reynoldszahlen für die kalten Messungen wird in Kapitel 2.4 beschrieben. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 29 dargestellt.

Die Reynoldszahl für Gas beschreibt den Axial-Freistrahler beim Austritt aus einem Gasverteilerrohr. Der Turbulenzumschlag zwischen laminarer und turbulenter Strömung für einen Axial-Freistrahler tritt bei Reynoldszahlen zwischen 100 und 1000 auf [3]. Folglich liegt für die Versuchsreihe mit $v_{Gas}=2$ m/s eine laminare bzw. niedrigturbulente Strömung und für die

Versuchsreihen mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s und $v_{\text{Gas}}=4$ m/s niedrigturbulente Strömungen für den Gas-Axial-Freistrah vor. Somit bilden alle kalten Messergebnisse die niedrigturbulenten Strömungsvorgänge in Biomasse Rostfeuerungen ab und können für die Modellierung eines CFD Turbulenzmodells verwendet werden.

Die Reynoldszahlen für die Strähnen beschreiben einen Mittelwert zwischen einem Gas-Axial-Freistrah und dem nächstgelegenen Luft-Axial-Freistrah. Diese Reynoldszahlen dienen als Orientierungsgröße bei der Entwicklung eines Strähnenbildungsmodells.

Tabelle 29: Reynoldszahlen für die Versuchsreihen in kalten Strömungen

Reynoldszahlen für kalte Versuche bezogen auf Normbedingungen									
Geschwindigkeiten			kinematische Viskosität		Längenmaß		Reynoldszahlen		
v_{Gas}	v_{Luft}	$v_{\text{Strähne}}$	Gas	Strähne	Gas	Strähne	Gas	Strähne	
[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m ² /s]	[m ² /s]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	
2,00	2,48	2,24					801	4583	
3,00	3,72	3,36	1,2482E-05	1,3037E-05	5,00	26,65	1202	6872	
4,00	4,97	4,48					1602	9163	

9 Ergebnisse und Diskussion Flammenmessungen

In diesem Kapitel werden für die Flammenmessungen die Versuchsparametervariationen und die Messergebnisse der Flammen-Konzentrationsmessungen dargestellt, analysiert und anschließend diskutiert.

9.1 Versuchsparameter für die Flammen-Konzentrationsmessungen

Für die Flammenversuche wurden drei Versuchsreihen durchgeführt. Die Volumenströme wurden so gewählt, dass sich drei unterschiedliche Einströmgeschwindigkeiten des Gasgemisches in den Messraum ergeben, welche den Gasgeschwindigkeiten der kalten Versuche entsprechen, um die Messergebnisse vergleichen zu können. In Kapitel 7.3 wird die Versuchsparameterwahl für die Flammenversuche näher beschrieben.

Die Versuchsparameter für alle drei Flammenversuche werden in Tabelle 30, Tabelle 31 und Tabelle 32 dargestellt. Aufgrund der eingestellten Volumenflüsse ergeben sich bei Normbedingungen (1,01325 bar und 273,15 K) drei unterschiedliche Gasaustrittsgeschwindigkeiten aus den Verteilerrohren von 2, 3 und 4 m/s. Die zugehörigen Luftströme treten mit den Geschwindigkeiten 2,54 m/s, 3,81 m/s und 5,08 m/s aus den Luft-Verteilerrohren aus

Für die Flammenversuche wird das Verbrennungsgas CH_4 mit Luft verbrannt. Aufgrund der chemischen Reaktionen bei der Verbrennung entstehen Gasspezies-Zwischenprodukte und Gasspezies-Endprodukte. Es werden folgende Gasspezieskonzentrationen gemessen: CH_4 , O_2 , CO , CO_2 und H_2O .

Tabelle 30: Versuchsparameter für Flammenmessungen mit $v_{\text{Gas}}=2\text{m/s}$

Gasgemisch = 16,49 NI/min	
CH_4 Volumenstrom	3,43 [NI/min]
Luft Volumenstrom für Vormischung	13,06 [NI/min]
CH_4 Volumenanteil	20,80 [Vol%]
Luft Volumenanteil für Vormischung	79,20 [Vol%]
Luft = 35,90 NI/min	
Volumenstrom	35,90 [NI/min]
Luft Volumenanteil	100,00 [Vol%]
Normbedingungen	
Druck	1,01325 [bar]
Temperatur	273,15 [K]
Strömungsgeschwindigkeiten bei Normbedingungen	
Gasgemisch	2,00 [m/s]
Luft	2,54 [m/s]
Lambdas für Verbrennung	
Lambda für Vormischung im Gasgemisch	0,4 [-]
Lambda für gesamten Brennraum	1,5 [-]

Tabelle 31: Versuchsparameter für Flammenmessungen mit $v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$

Gasgemisch = 24,74 NI/min	
CH_4 Volumenstrom	5,15 [NI/min]
Luft Volumenstrom für Vormischung	19,59 [NI/min]
CH_4 Volumenanteil	20,82 [Vol%]
Luft Volumenanteil für Vormischung	79,18 [Vol%]
Luft = 53,90 NI/min	
Volumenstrom	53,90 [NI/min]
Luft Volumenanteil	100,00 [Vol%]
Normbedingungen	
Druck	1,01325 [bar]
Temperatur	273,15 [K]
Strömungsgeschwindigkeiten bei Normbedingungen	
Gasgemisch	3,00 [m/s]
Luft	3,81 [m/s]
Lambdas für Verbrennung	
Lambda für Vormischung im Gasgemisch	0,4 [-]
Lambda für gesamten Brennraum	1,5 [-]

Tabelle 32: Versuchsparameter für Flammenmessungen mit $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$

Gasgemisch = 32,99 NI/min	
CH ₄ Volumenstrom	6,86 [NI/min]
Luft Volumenstrom für Vormischung	26,13 [NI/min]
CH ₄ Volumenanteil	20,79 [Vol%]
Luft Volumenanteil für Vormischung	79,21 [Vol%]
Luft = 71,85 NI/min	
Volumenstrom	71,70 [NI/min]
Luft Volumenanteil	100,00 [Vol%]
Normbedingungen	
Druck	1,01325 [bar]
Temperatur	273,15 [K]
Strömungsgeschwindigkeiten bei Normbedingungen	
Gasgemisch	4,00 [m/s]
Luft	5,08 [m/s]
Lambdas für Verbrennung	
Lambda für Vormischung im Gasgemisch	0,4 [-]
Lambda für gesamten Brennraum	1,5 [-]

9.2 Ergebnisse der Konzentrationsmessungen in den Flammen

Für die Messergebnisse der Flamme wurden RGA- und FTIR-Messdaten verwendet. Aufgrund der höheren Messgenauigkeit wurden alle Spezieskonzentrationen, welche von der RGA erfasst werden können, auch mit dieser gemessen. Da ein Teil der CO-Messkonzentrationen außerhalb des RGA-Messbereichs von 10.000 vppm liegen, werden diese parallel von der FTIR, welche einen größeren Messbereich hat, gemessen. Zusammengefasst werden die Spezieskonzentrationen CO₂ und O₂ mit der RGA, CH₄ und H₂O mit FTIR und CO parallel mit RGA und FTIR gemessen. Alle Konzentrationsangaben beziehen sich auf das trockene Gesamtgasgemisch. Es wurden in drei unterschiedlichen Messhöhen von 15 mm, 95 mm und 205 mm über den Verteilerrohren Konzentrationsprofile vermessen. Über den Achsabstand wurden an neun Messpositionen, mit einer Messauflösung von 6,25 mm, die Konzentrationen gemessen. Pos 5 bzw. Abstand 0 mm (siehe Tabelle 11) markiert den Messpunkt im Achszentrum der Strömung.

Die zusammengefassten RGA- und FTIR-Messwerte der Geschwindigkeitsvarianten $v_{\text{Gas}}=2$ m/s, $v_{\text{Gas}}=3$ m/s und $v_{\text{Gas}}=4$ m/s, gemessen in den Flammen, sind in Tabelle 33, Tabelle 34 und Tabelle 35 dargestellt.

Tabelle 33: Messwerte der CO, CO₂, H₂O, CH₄ und O₂ Konzentrationen der Flammen-
Versuchsreihen mit v_{Gas}=2m/s

Erläuterung: Rot markierte CO Konzentrationen liegen außerhalb des RGA Messbereichs

Gasgeschwindigkeit = 2,00m/s Luftgeschwindigkeit = 2,54m/s									
	Pos11	Pos10	Pos9	Pos8	Pos7	Pos6	Pos5	Pos4	Pos3
	Abstand [mm]								
	-37,5	-31,25	-25	-18,75	-12,5	-6,25	0	6,25	12,5
Messhöhe = 15mm									
CO _{FTIR} [vppm]	71	79	81	1423	8394	26766	29551	18214	6997
CO _{RGA} [vppm]	86	95	99	1416	7241	13049	13049	13049	6429
CO _{2RGA} [Vol%]	3,51	3,50	1,92	3,22	3,18	5,17	6,34	4,57	4,38
H ₂ O _{FTIR} [Vol%]	6,90	6,85	4,43	6,30	6,96	10,69	12,35	9,30	8,38
CH ₄ _{FTIR} [Vol%]	0,01	0,01	0,05	0,50	7,27	5,20	2,27	5,15	1,53
O ₂ _{RGA} [Vol%]	14,16	14,19	14,15	14,48	12,22	6,71	5,05	9,18	11,56
Messhöhe = 95mm									
CO _{FTIR} [vppm]	114	124	195	1129	19961	55158	49328	46341	38654
CO _{RGA} [vppm]	127	138	206	1051	13049	13049	13049	13049	13049
CO _{2RGA} [Vol%]	3,00	2,91	3,02	4,54	8,86	7,08	4,92	4,40	7,68
H ₂ O _{FTIR} [Vol%]	6,40	6,19	6,51	9,36	16,22	13,98	11,44	10,29	14,39
CH ₄ _{FTIR} [Vol%]	0,03	0,04	0,05	0,05	0,12	1,33	4,22	7,83	1,25
O ₂ _{RGA} [Vol%]	15,03	15,19	14,94	11,95	2,64	0,48	3,58	5,19	2,03
Messhöhe = 205mm									
CO _{FTIR} [vppm]	94	107	134	321	1117	10395	21279	32520	25196
CO _{RGA} [vppm]	108	120	142	296	1004	8918	13049	13049	13049
CO _{2RGA} [Vol%]	3,99	3,97	4,10	4,60	5,41	7,29	8,12	8,78	8,56
H ₂ O _{FTIR} [Vol%]	8,13	8,15	8,40	9,26	10,57	13,21	13,91	14,50	14,64
CH ₄ _{FTIR} [Vol%]	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,05	0,09	0,12	0,10
O ₂ _{RGA} [Vol%]	13,15	13,18	12,91	11,97	10,48	6,42	4,02	1,76	3,06

Tabelle 34: Messwerte der CO, CO₂, H₂O, CH₄ und O₂ Konzentrationen der Flammen-
Versuchsreihen mit v_{Gas}=3m/s

Erläuterung: Rot markierte CO Konzentrationen liegen außerhalb des RGA Messbereichs

Gasgeschwindigkeit = 3,00m/s Luftgeschwindigkeit = 3,81 m/s									
	Pos11	Pos10	Pos9	Pos8	Pos7	Pos6	Pos5	Pos4	Pos3
	Abstand [mm]								
	-37,5	-31,25	-25	-18,75	-12,5	-6,25	0	6,25	12,5
Messhöhe = 15mm									
CO _{FTIR} [vppm]	43	43	119	912	4533	12086	18488	15856	5669
CO _{RGA} [vppm]	60	60	128	821	3535	10174	13049	13044	4542
CO _{2RGA} [Vol%]	3,43	3,47	2,97	3,08	3,24	4,65	4,91	4,33	4,17
H ₂ O _{FTIR} [Vol%]	7,15	7,20	6,06	6,36	6,96	9,83	10,76	9,30	8,46
CH ₄ _{FTIR} [Vol%]	0,00	0,00	0,08	0,98	4,25	4,98	5,64	4,60	1,42
O _{2RGA} [Vol%]	14,34	14,27	15,23	14,76	13,35	9,79	8,19	10,00	12,18
Messhöhe = 95mm									
CO _{FTIR} [vppm]	100	153	297	1383	31723	53412	39058	28842	39233
CO _{RGA} [vppm]	102	160	281	1361	13049	13049	13049	13049	13049
CO _{2RGA} [Vol%]	2,90	2,90	2,66	4,18	8,08	6,67	3,63	2,74	6,16
H ₂ O _{FTIR} [Vol%]	6,48	6,23	5,80	8,70	16,16	12,51	9,31	7,38	12,58
CH ₄ _{FTIR} [Vol%]	0,03	0,07	0,11	0,10	0,78	2,83	9,71	11,66	3,43
O _{2RGA} [Vol%]	15,25	15,23	15,65	12,60	2,05	1,91	6,97	9,48	3,85
Messhöhe = 205mm									
CO _{FTIR} [vppm]	127	134	202	781	7393	23341	48168	50140	24817
CO _{RGA} [vppm]	136	142	204	677	6011	13049	13049	13049	13049
CO _{2RGA} [Vol%]	3,55	3,57	4,05	5,09	7,28	8,40	8,02	7,55	7,74
H ₂ O _{FTIR} [Vol%]	7,45	7,48	8,36	10,10	13,51	14,89	14,25	14,62	14,47
CH ₄ _{FTIR} [Vol%]	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,11	0,57	1,06	0,38
O _{2RGA} [Vol%]	13,97	13,92	13,01	11,10	6,74	3,25	0,70	1,02	3,91

Tabelle 35: Messwerte der CO, CO₂, H₂O, CH₄ und O₂ Konzentrationen der Flammen-Versuchsreihen mit v_{Gas}=4m/s

Erläuterung: Rot markierte CO Konzentrationen liegen außerhalb des RGA Messbereichs

Gasgeschwindigkeit = 4,00m/s		Luftgeschwindigkeit = 5,08m/s							
	Pos11	Pos10	Pos9	Pos8	Pos7	Pos6	Pos5	Pos4	Pos3
	Abstand [mm]	Abstand [mm]	Abstand [mm]	Abstand [mm]	Abstand [mm]	Abstand [mm]	Abstand [mm]	Abstand [mm]	Abstand [mm]
	-37,5	-31,25	-25	-18,75	-12,5	-6,25	0	6,25	12,5
Messhöhe = 15mm									
CO _{FTIR} [vppm]	86	81	125	591	3680	6787	8476	14475	6106
CO _{RGA} [vppm]	99	94	129	525	2750	5635	7158	12044	5020
CO _{2RGA} [Vol%]	3,63	3,51	2,87	3,42	3,33	4,25	2,91	4,33	4,37
H ₂ O _{FTIR} [Vol%]	7,45	7,32	5,98	7,05	7,02	8,90	6,70	9,17	8,74
CH ₄ _{FTIR} [Vol%]	0,00	0,00	0,10	0,27	3,82	2,24	10,65	3,01	1,03
O ₂ _{RGA} [Vol%]	14,02	14,19	15,39	14,30	13,41	11,70	12,02	10,51	11,89
Messhöhe = 95mm									
CO _{FTIR} [vppm]	148	154	341	2710	37504	46663	47558	47278	49063
CO _{RGA} [vppm]	161	166	327	1926	13049	13049	13049	13049	13048
CO _{2RGA} [Vol%]	2,85	2,58	2,50	4,13	7,79	5,19	4,15	3,78	6,97
H ₂ O _{FTIR} [Vol%]	6,25	5,66	5,52	8,73	14,98	11,76	11,01	9,43	13,61
CH ₄ _{FTIR} [Vol%]	0,04	0,06	0,13	0,19	1,09	4,35	6,55	8,56	1,86
O ₂ _{RGA} [Vol%]	15,38	15,90	15,99	12,62	2,03	4,36	5,19	5,59	1,63
Messhöhe = 205mm									
CO _{FTIR} [vppm]	418	446	733	4904	21875	39679	58486	49576	39507
CO _{RGA} [vppm]	376	401	651	3666	13049	13049	13049	13049	13049
CO _{2RGA} [Vol%]	3,58	3,73	4,45	6,25	8,01	8,04	6,50	5,26	6,25
H ₂ O _{FTIR} [Vol%]	7,47	7,76	9,04	12,02	14,88	15,22	13,69	12,34	12,96
CH ₄ _{FTIR} [Vol%]	0,09	0,09	0,07	0,05	0,14	0,46	2,40	3,99	2,56
O ₂ _{RGA} [Vol%]	13,92	13,64	12,30	8,78	3,99	1,67	1,52	3,74	3,87

Aus diesen Konzentrationswerten wurden die nachfolgenden Konzentrationsdiagramme von Diagramm 15 bis Diagramm 29 erstellt.

In den drei nachfolgenden CH₄-Konzentrationsdiagrammen erkennt man eine grundsätzliche Abnahme der CH₄ Konzentration über die Höhe. Die CH₄-Anfangskonzentration im Gasgemisch beim Eintritt in den Reaktor beträgt 20,8 Vol%. Die Konzentrationsprofile in den Messhöhen 15 mm und 95 mm über den Verteilerrohren weisen innerhalb des Achsabstandes von 25 mm keine regelmäßige Profilentwicklung, abhängig von der Gasgeschwindigkeit auf und schwanken stark. Die Konzentrationsprofile in der Messhöhe 205 mm zeigen eine Zunahme der CH₄-Konzentration über die Gasgeschwindigkeit. Bei einer Gasgeschwindigkeit von v_{Gas}=2 m/s ist in der obersten Messposition nahezu das gesamte CH₄ vollständig verbrannt, wohingegen bei v_{Gas}= 4 m/s noch ein ausgeprägtes CH₄-Konzentrationsprofil in der Messhöhe 205 mm über den Verteilerrohren vorliegt. Man erkennt weiteres, dass die gemessenen Maximalwerte für die Messhöhen 95mm und 205 mm immer bei Achsabstand 6,25 mm liegen

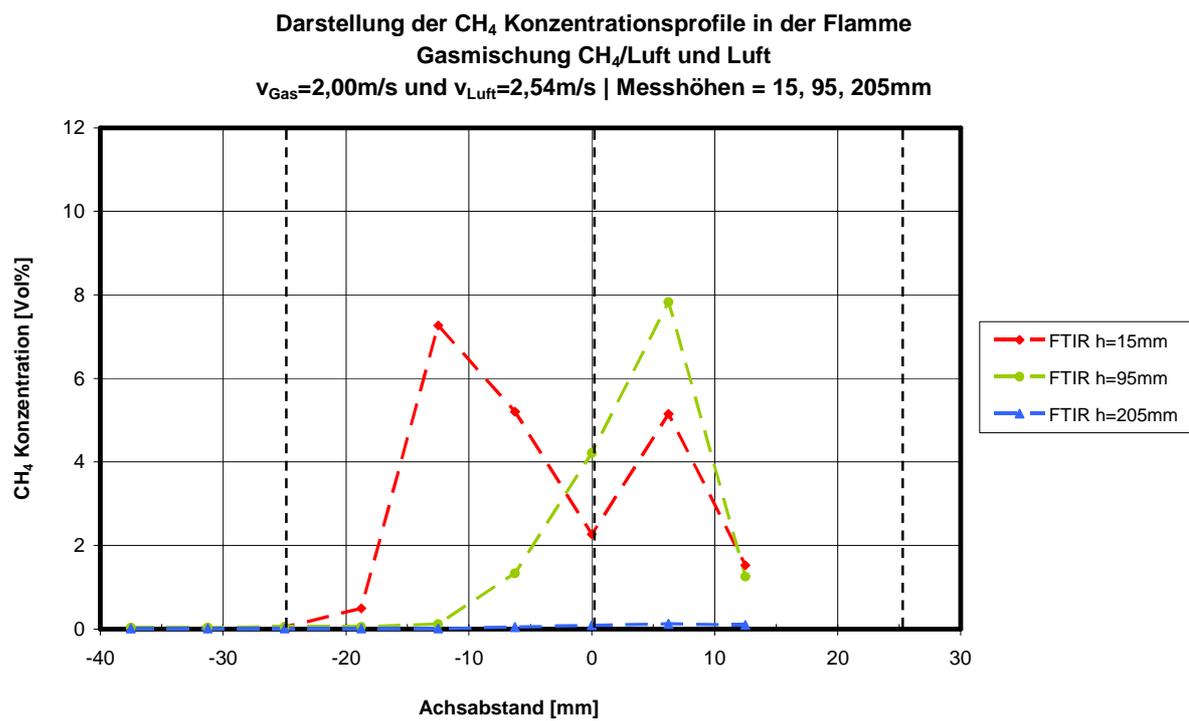


Diagramm 15: CH₄-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=2m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

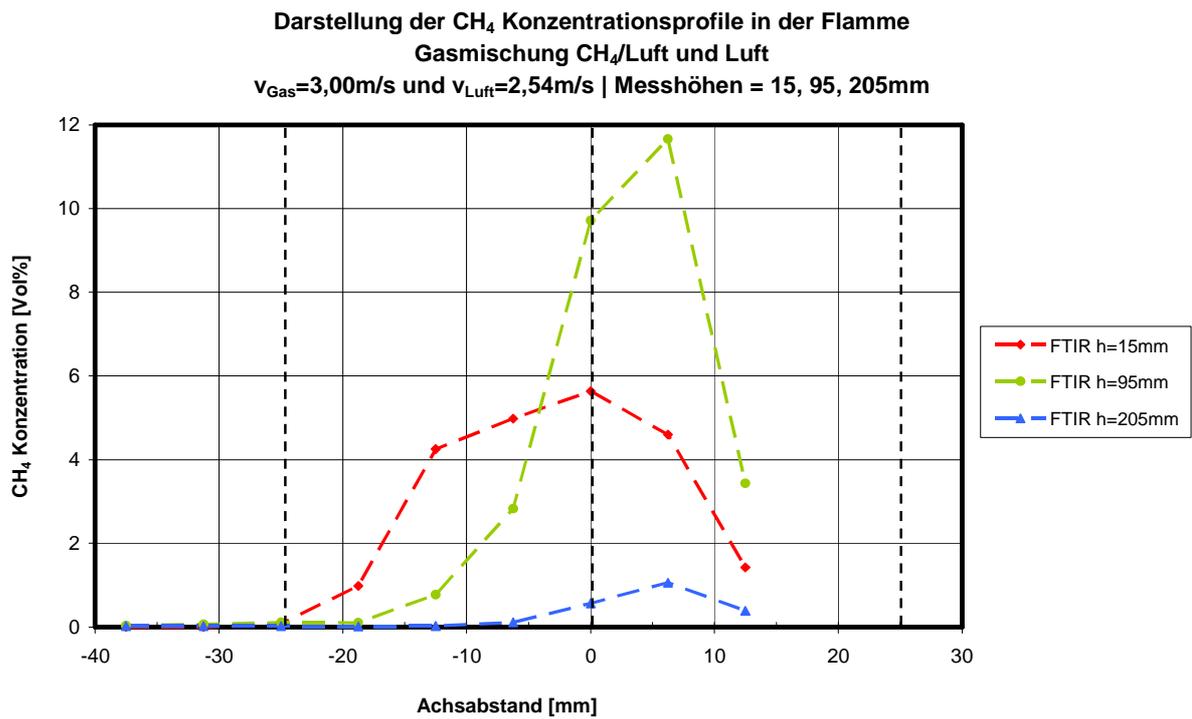


Diagramm 16: CH₄-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=3m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

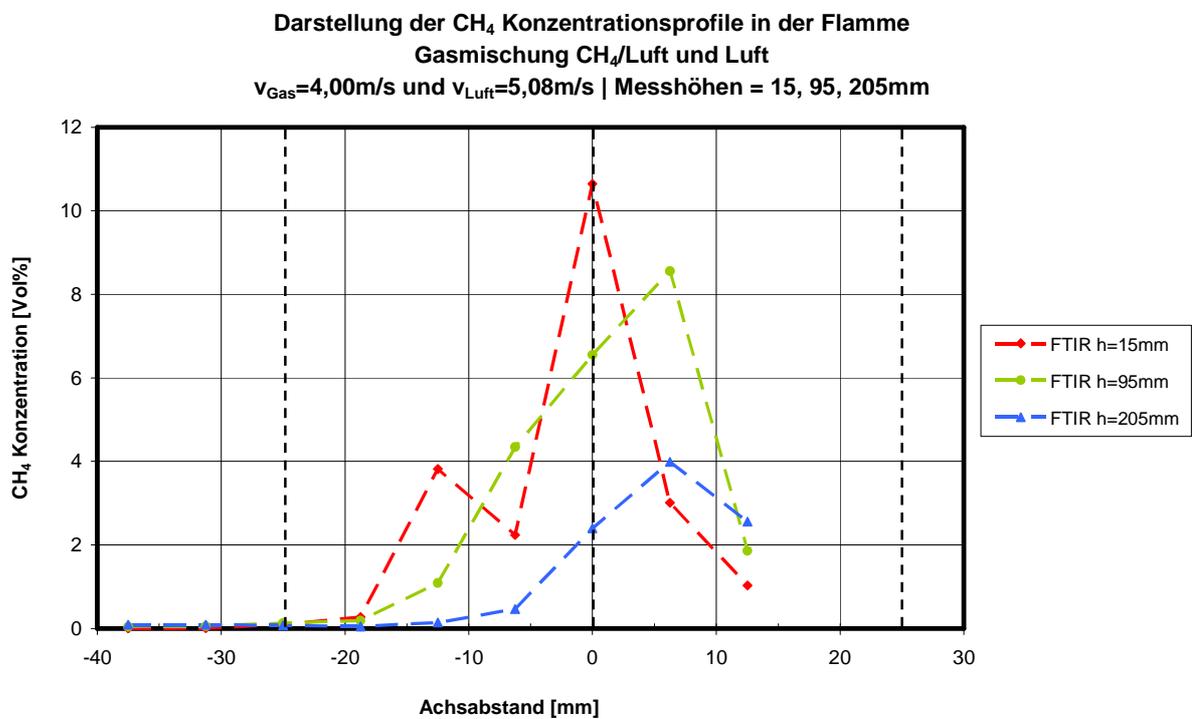


Diagramm 17: CH₄-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=4m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

In den drei nachfolgenden O₂-Konzentrationsdiagrammen erkennt man den Gasgeschwindigkeitseinfluss auf die Konzentrationsprofile in der Messebene 15 mm über den Verteilerrohren. Das Gasgemisch tritt mit einer O₂-Konzentration von 16,6 Vol% in die Reaktorkammer ein. Die O₂-Profilausprägung nimmt mit Zunahme der Gasgeschwindigkeit ab, wohingegen die maximalen O₂-Konzentrationen zunehmen. Für die Konzentrationsprofile in den Messhöhen 95 mm und 205 mm ist keine Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit zu erkennen. Die Konzentrationskurven auf den Messhöhen 95 mm und 205 mm weisen für alle Geschwindigkeitsvarianten ein ähnliches Profil auf.

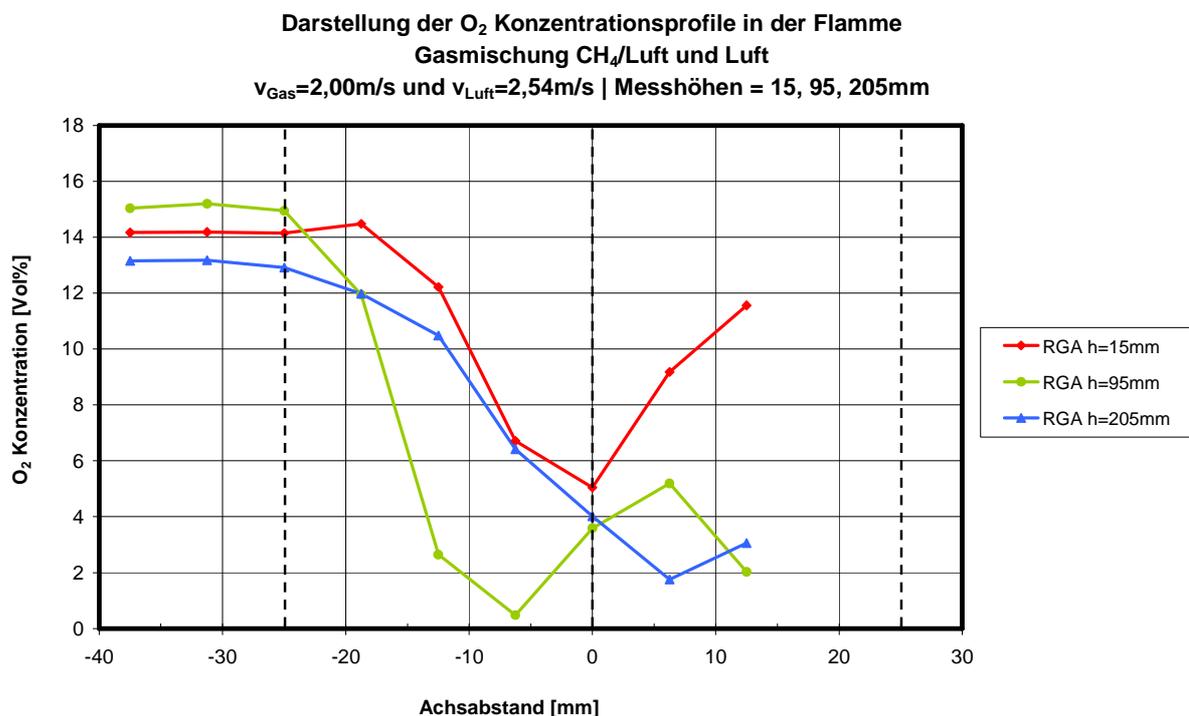


Diagramm 18: O₂-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=2m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

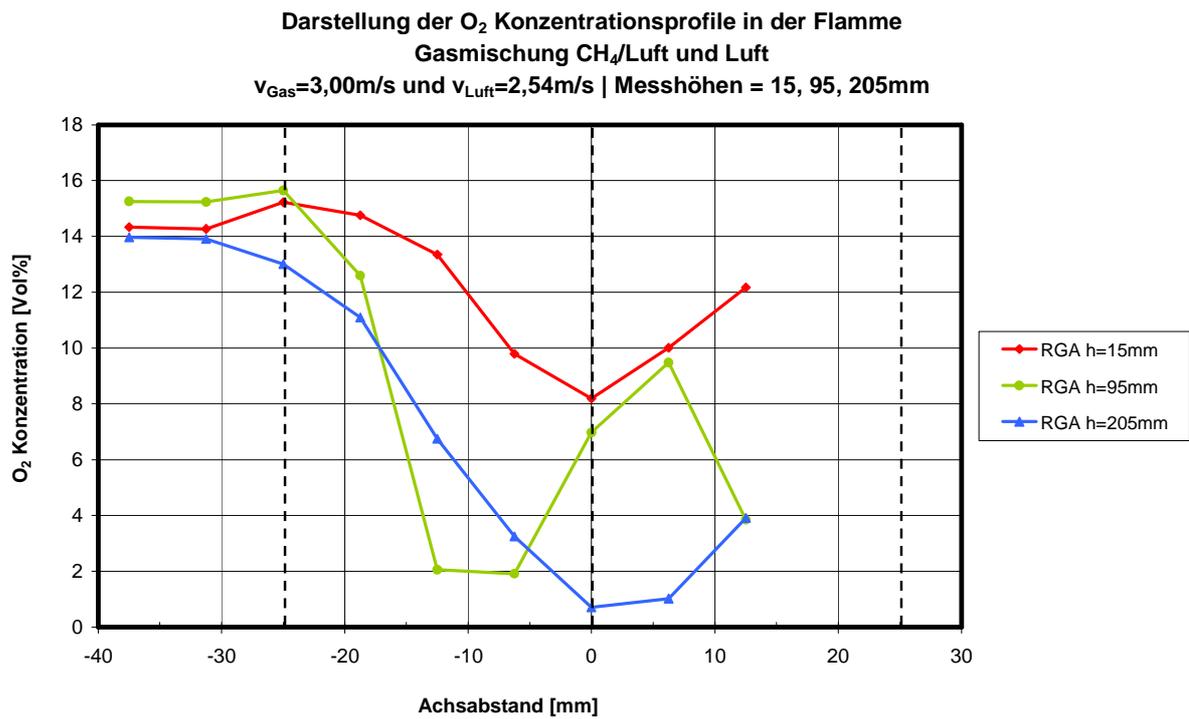


Diagramm 19: O₂-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=3m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

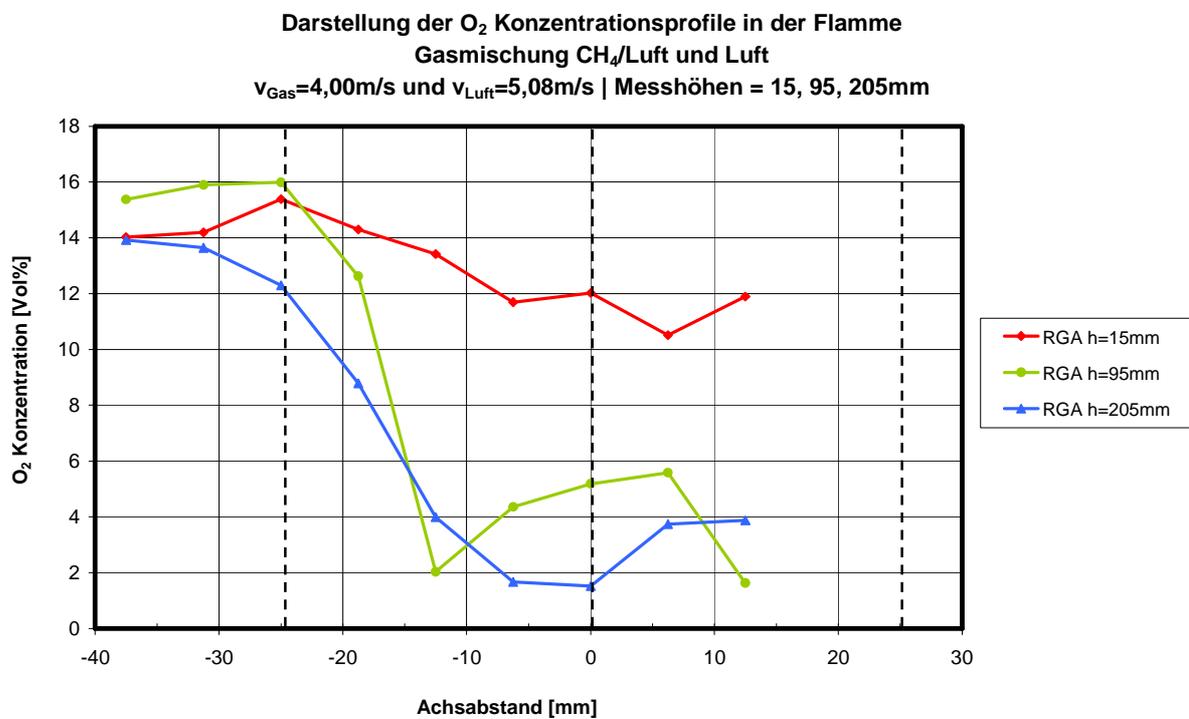


Diagramm 20: O₂-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=4m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

In den drei nachfolgenden CO-Konzentrationsdiagrammen erkennt man den Einfluss der Gasgeschwindigkeit auf die CO Bildung in den verschiedenen Messhöhen über den Verteilerrohren. Die Bildung von CO in der untersten Messposition 15 mm nimmt mit Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit ab. Der CO Maximalwert sinkt in dieser Messhöhe bei Zunahme der Geschwindigkeit von 30.000 vppm über 18.000 vppm auf 14.000 vppm. In allen drei Fällen liegen ausgeprägte Glockenprofile innerhalb des Achsabstandes von 25 mm vor. Mittels der Konzentrationsprofile in den Messhöhen 95 mm und 205 mm kann keine eindeutige Geschwindigkeitsabhängigkeit erkannt werden. Die höchsten CO Konzentrationen werden in der mittleren und obersten Messposition gemessen. Außerhalb des Achsabstandes von 25 mm liegen CO Konzentrationen nur noch im Größenbereich unter 1.000 vppm vor. Im Messbereich unter 10.000 vppm korrelieren die Messergebnisse der RGA und FTIR zufriedenstellend.

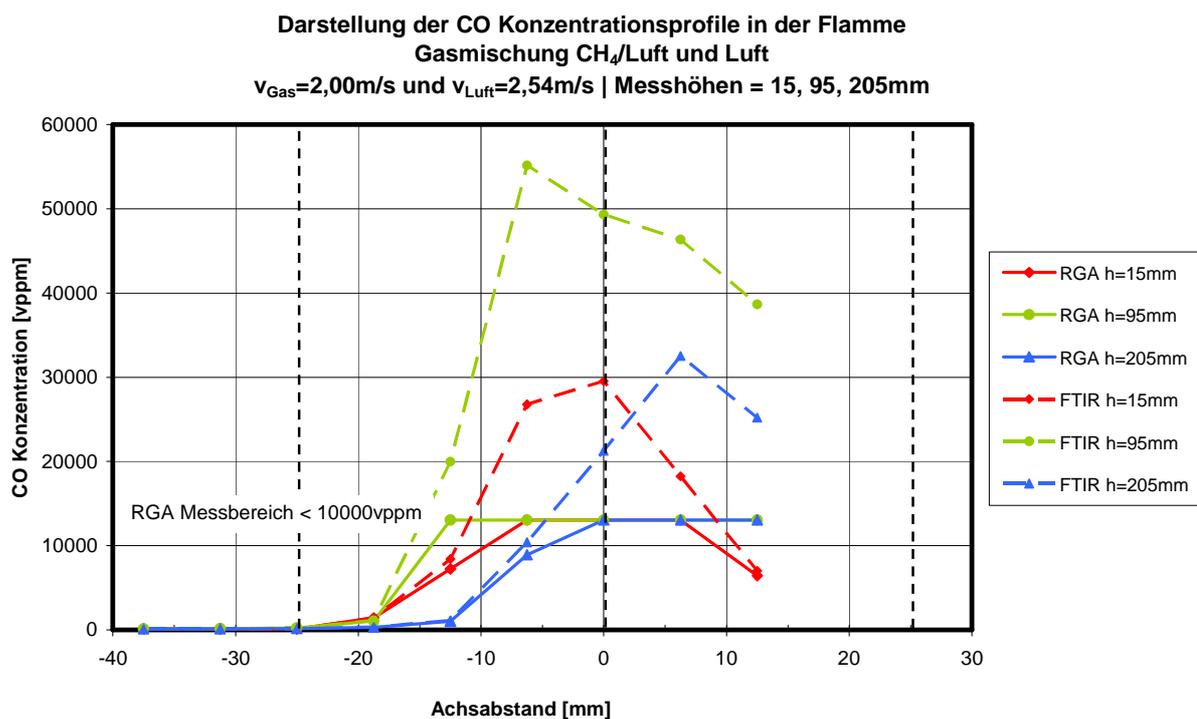


Diagramm 21: CO-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=2m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

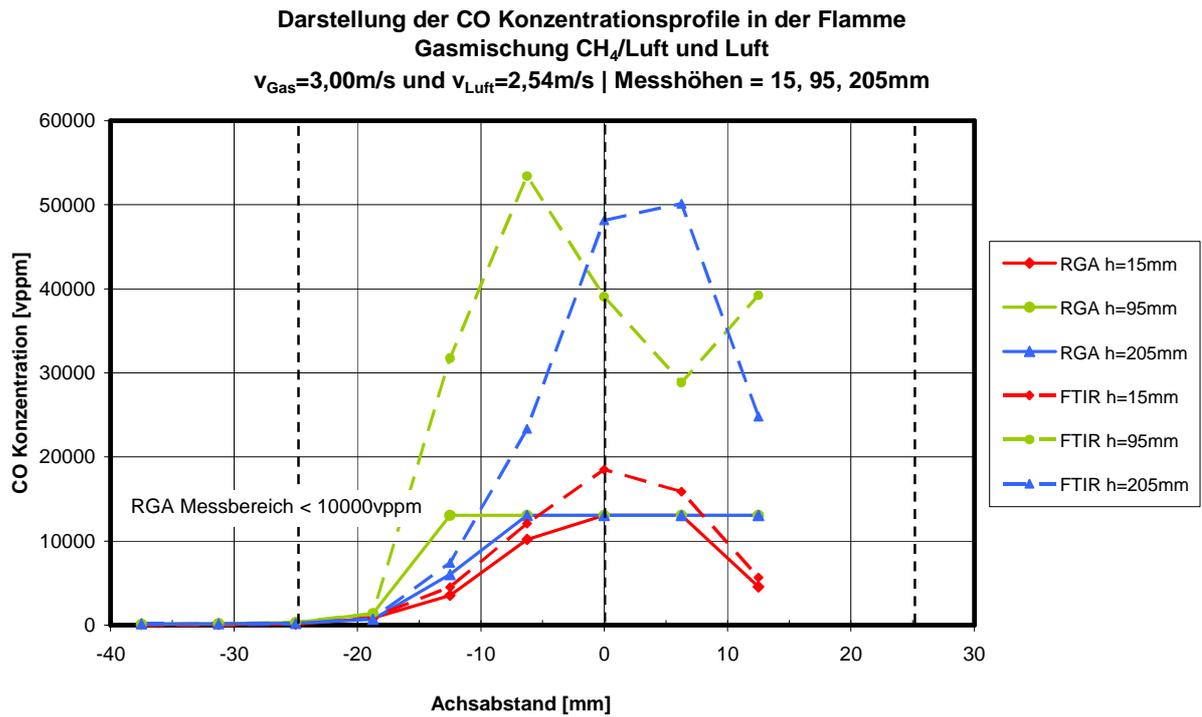


Diagramm 22: CO-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=3\text{m/s}$

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

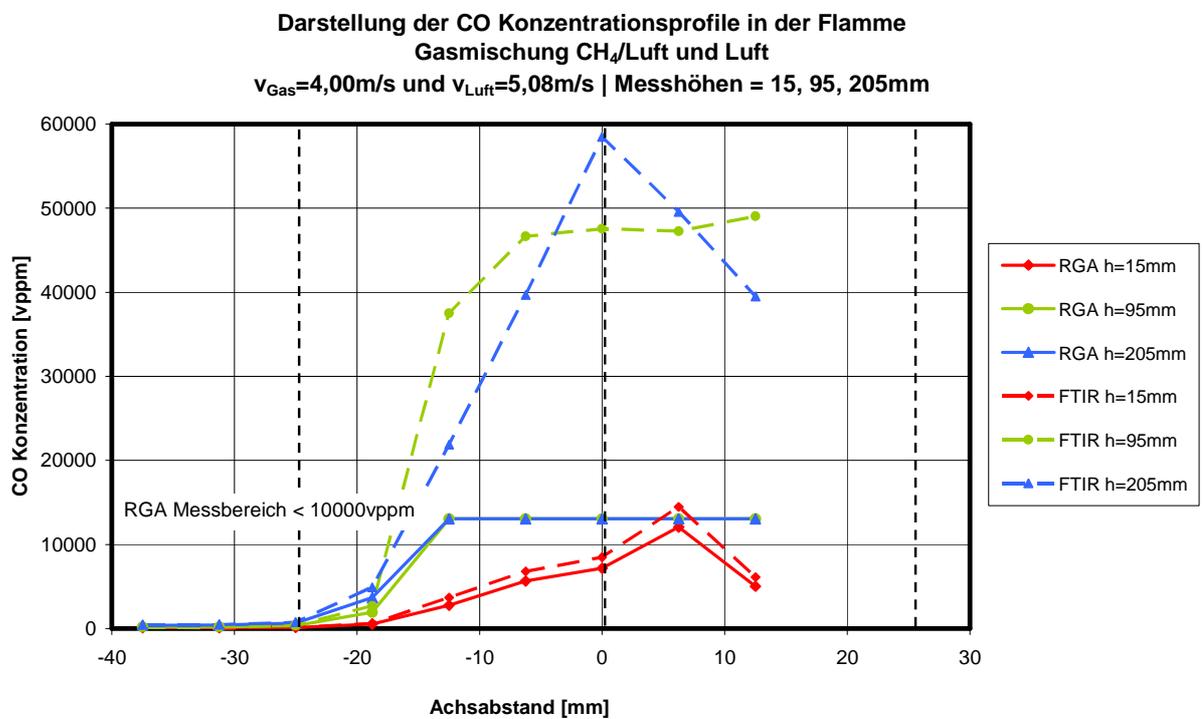


Diagramm 23: CO-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit $v_{\text{Gas}}=4\text{m/s}$

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

Die nachfolgenden CO₂-Konzentrationsdiagramme der Flammenversuche zeigen die Abhängigkeit der CO₂-Konzentrationsprofile von der Gasgeschwindigkeit. Über den Luftstrom und den Gasstrom wird kein CO dem Reaktor zugeführt. Die CO₂-Moleküle bilden sich erst im Laufe der Verbrennung. In der Messebene 15 mm über den Verteilerrohren ergeben sich für alle Geschwindigkeitsvarianten CO₂-Konzentrationsprofile. In der Messebene 95 mm erkennt man für alle Geschwindigkeitsvarianten jeweils eine CO₂-Konzentrationspitze beim Achsabstand -12,5 mm, welche annähernd symmetrisch auf dem Achsabstand 12,5 mm auftritt. Für die Messhöhe 205 mm über den Verteilerrohren ergibt sich für alle Geschwindigkeitsvarianten annähernd ein CO₂-Glockenprofil. Außerhalb des Achsabstandes von 25 mm liegt für alle Konzentrationsprofile annähernd die gleiche Mischkonzentration vor. Bei einer detaillierten Betrachtung erkennt man, dass in allen Fällen die CO₂-Mischkonzentration für die Messhöhe 95 mm am niedrigsten ist und die CO₂-Mischkonzentration für die Messhöhe 205 mm am größten ist.

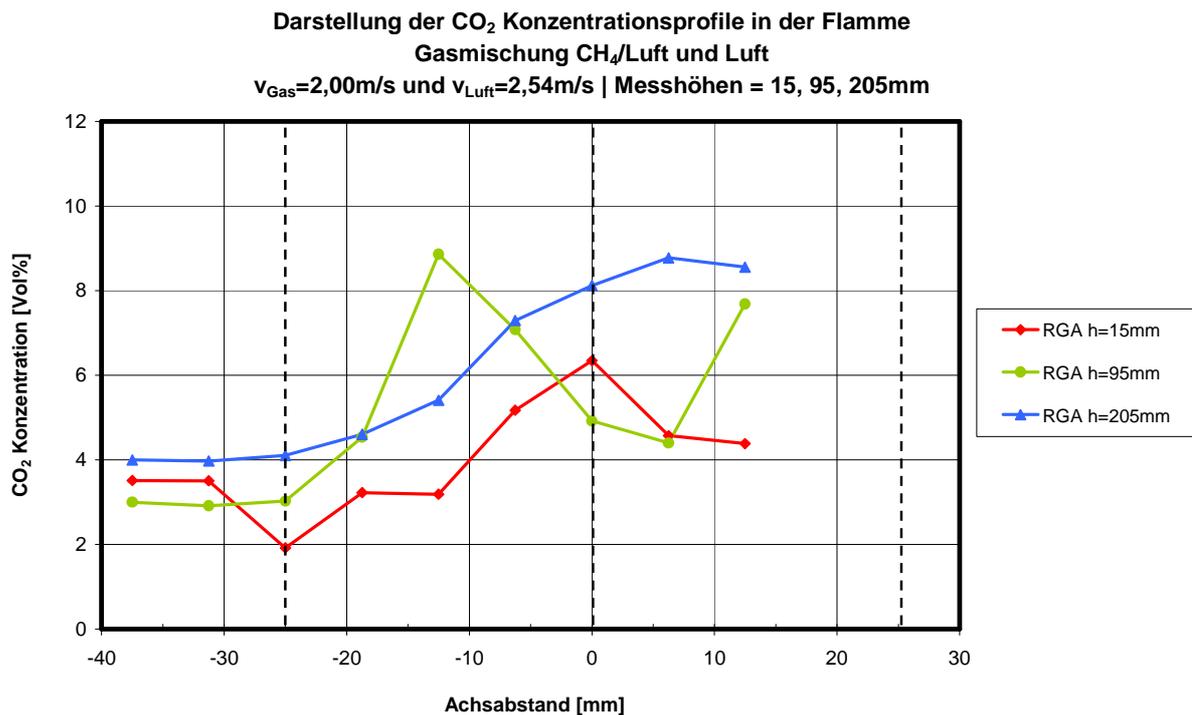


Diagramm 24: CO₂-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=2m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

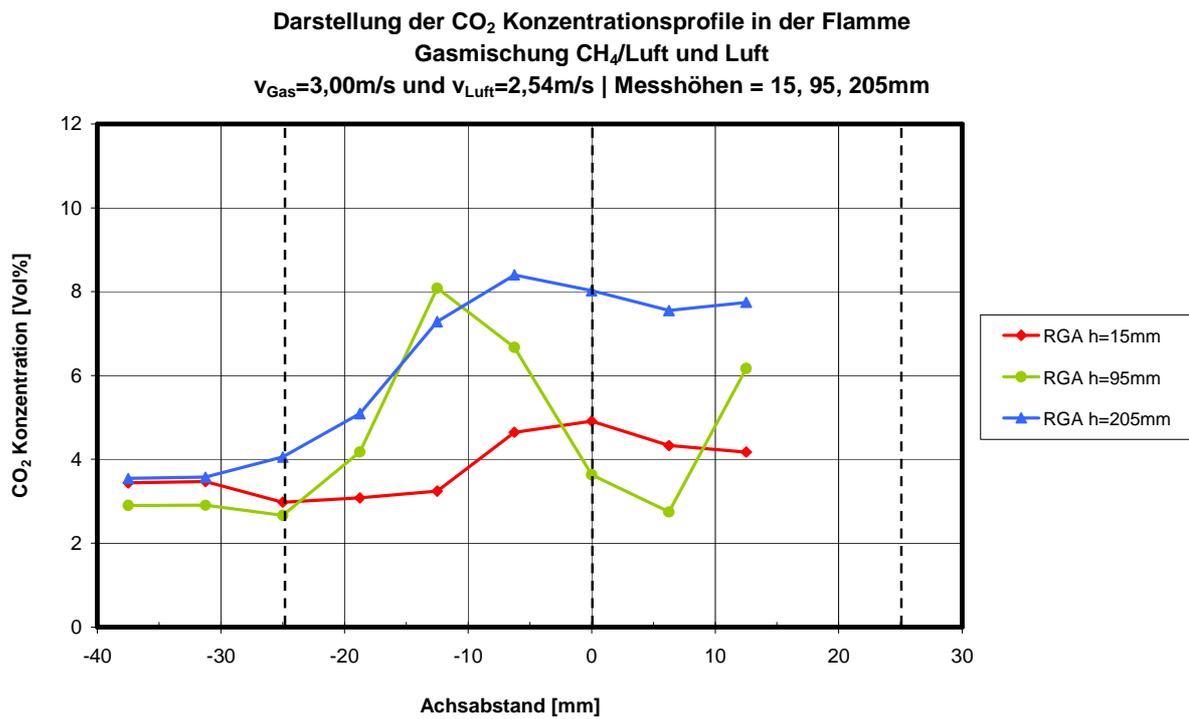


Diagramm 25: CO₂-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=3m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

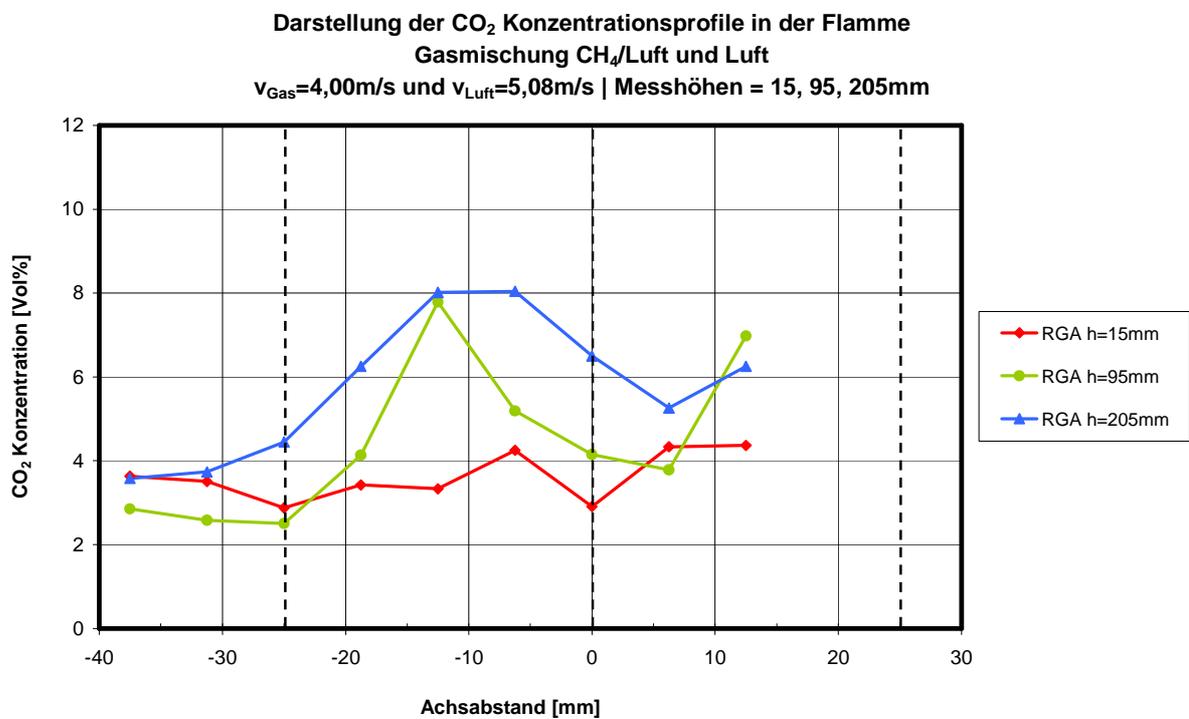


Diagramm 26: CO₂-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=4m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

Die nachfolgenden H₂O-Konzentrationsdiagramme der Flammenversuche zeigen bezüglich der Kurvenform ähnliche Konzentrationsprofile, wie die zuvor dargestellten CO₂-Konzentrationsdiagramme.

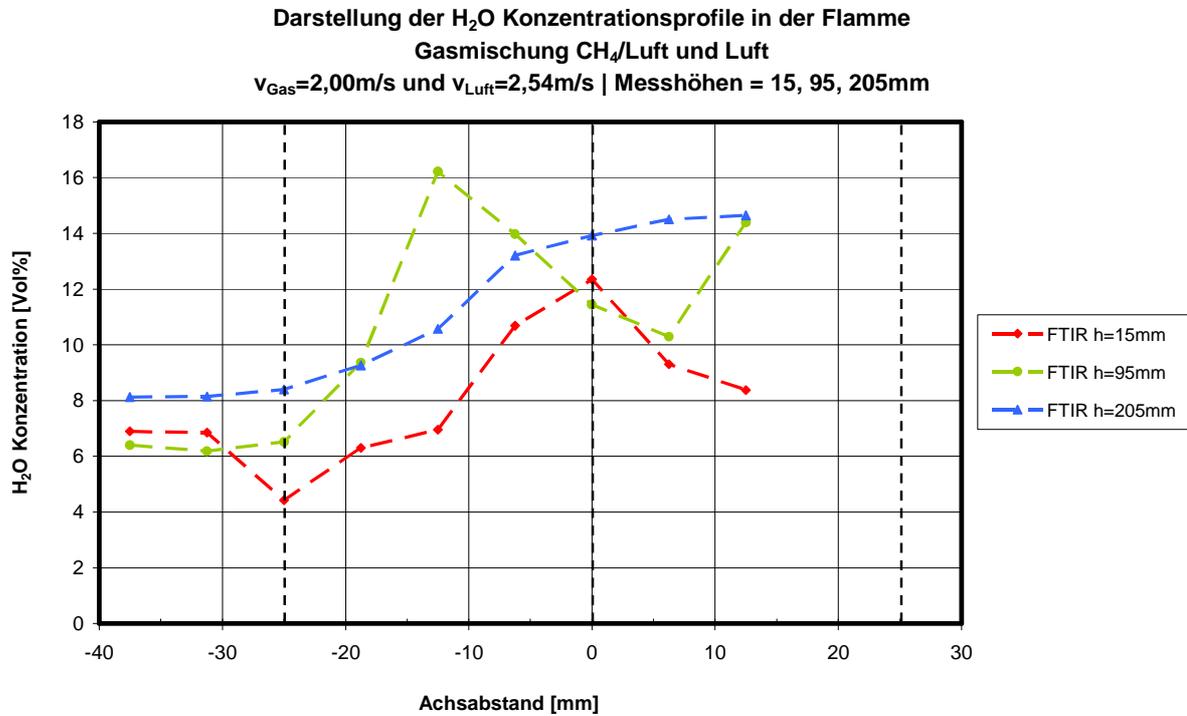


Diagramm 27: H₂O-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=2m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

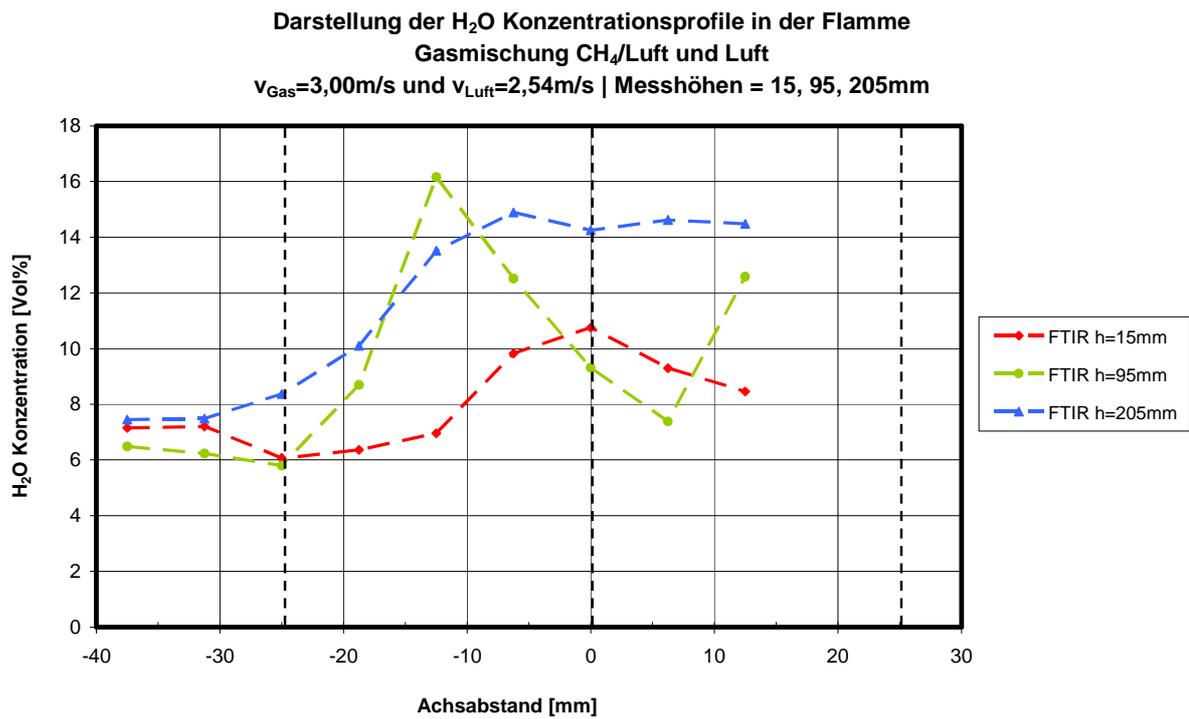


Diagramm 28: H₂O-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=3m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

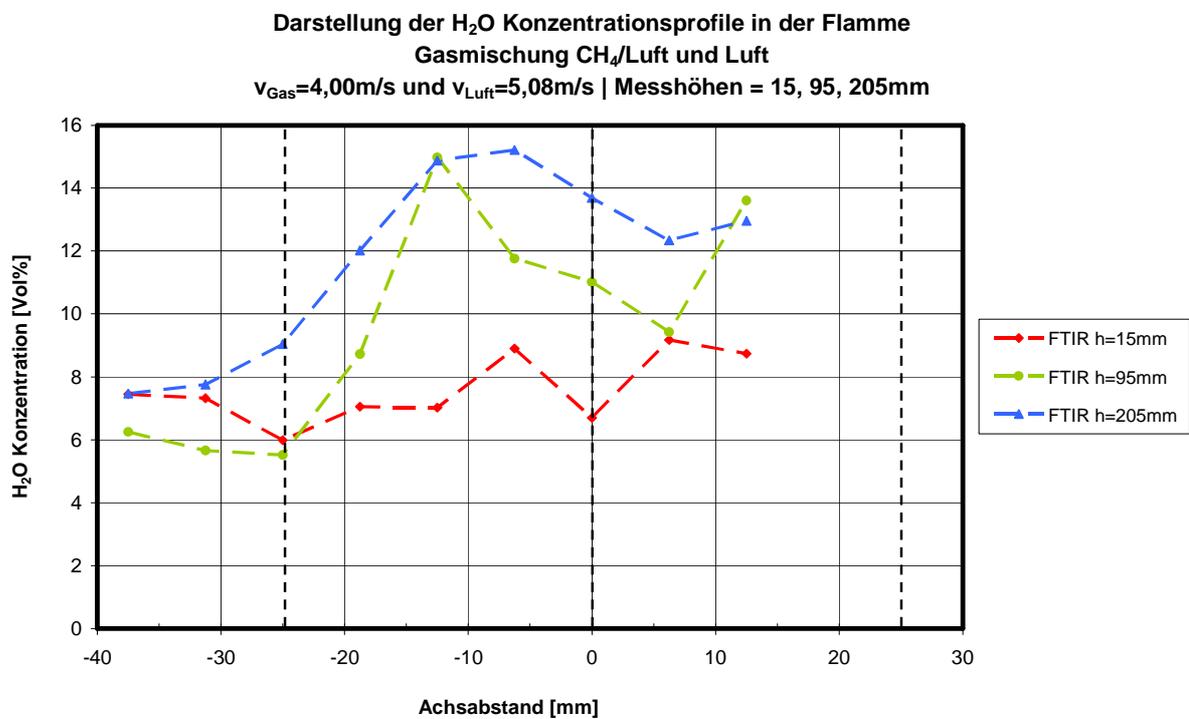


Diagramm 29: H₂O-Konzentration über den Achsabstand in der Flamme mit v_{Gas}=4m/s

Erläuterung: vertikale, gestrichelte Linien markieren die Gaseinlassöffnungen

9.3 Diskussion der Flammenmessungen

Die Messergebnisse zeigen, dass die Gas- und Lufteintrittsgeschwindigkeiten mit dem Verbrennungsfortschritt von CH_4 gekoppelt sind. Die Konzentrationen von CH_4 nehmen über die Höhe mit Zunahme der Eintrittsgeschwindigkeit zu. In der höchsten Messebene 205 mm ist das CH_4 -Gas bei $v_{\text{Gas}}=2$ m/s nahezu vollständig verbrannt, wohingegen bei den Versuchsreihen mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s und $v_{\text{Gas}}=4$ m/s noch CH_4 -Konzentrationsprofile bestehen. Die CH_4 -Messergebnisse in der Messhöhe 205 mm für alle Geschwindigkeitsvarianten werden im Diagramm 30 dargestellt.

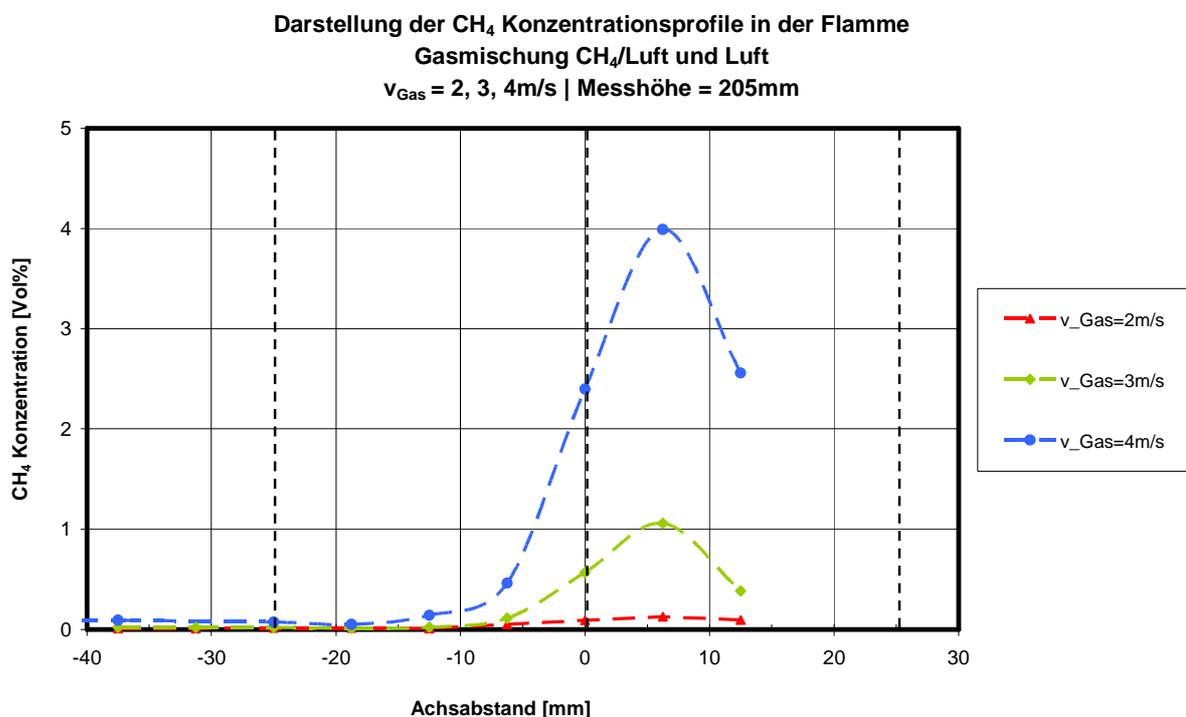


Diagramm 30: CH_4 -Konzentrationen über den Achsabstand in der Flamme auf der Messhöhe 205 mm für alle Geschwindigkeitsvarianten

Für die Ergebnisvalidierung der Flammenmessungen mit chemischer Reaktion wurde eine Verbrennungsrechnung für eine vollständige Verbrennung mit den eingeregelter Volumenströmen CH_4 und Luft durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 36 dargestellt.

Tabelle 36: Berechnung der Volumenströme für die vollständige Verbrennung bei den Flammenversuchen

Berechnung der Volumenströme für die Verbrennung von CH ₄ mit Luft								
Versuchsparameter Geschwindigkeit [m/s]	Edukte		Produkte				Bilanz	
	CH ₄ [NI/min]	Luft [NI/min]	CO ₂ [NI/min]	H ₂ O [NI/min]	N ₂ [NI/min]	Luft [NI/min]	Summe _{Ein} [NI/min]	Summe _{Aus} [NI/min]
2	3,43	48,27	3,38	6,76	25,45	16,11	51,70	51,70
3	5,15	72,67	5,09	10,18	38,30	24,24	77,82	77,82
4	6,86	97,04	6,80	13,59	51,14	32,37	103,90	103,90

Ausgehend von den berechneten Volumenströmen in Tabelle 36 können die Spezieskonzentrationen für O₂, CO₂ und H₂O im trockenen Gasmisch nach vollständiger Verbrennung berechnet werden. Die Ergebnisse der berechneten Spezieskonzentrationen werden in Tabelle 37 dargestellt. Diese Spezieskonzentrationen werden nachfolgend mit den Konzentrationsmesswerten der Flammenmessungen in Tabelle 38 verglichen und dienen als Referenz zur Beurteilung der Flammenmessergebnisse.

Tabelle 37: O₂-, CO₂- und H₂O-Konzentrationsberechnung aus eingeregelt CH₄- und Luft-Volumenströmen für vollständige Verbrennung

O ₂ -, CO ₂ - und H ₂ O-Konzentrationsberechnung aus Volumenströmen für vollständige Verbrennung			
Versuchsparameter Geschwindigkeit [m/s]	Konzentrationen bezogen auf trockens Gasmisch		
	O ₂ [NI/min]	CO ₂ [NI/min]	H ₂ O [NI/min]
2			
3	7,53	7,53	15,05
4			

Aus den Konzentrationsmessergebnissen lässt sich schließen, dass für die Flammen-Versuchsreihen in der maximalen Messhöhe 205 mm keine vollständige Verbrennung vorliegt, da in dieser Höhe bei allen Messungen noch unverbrannte Gasspezies gemessen wurden. Außerdem sind nicht alle vorhandenen Konzentrationsprofile in dieser Messhöhe symmetrisch ausgebildet. Zusammengefasst kann man festhalten, dass nicht reproduzierbare Spezieskonzentrationsasymmetrien vorliegen. Vorversuche haben diese Asymmetrien bereits aufgezeigt, weshalb auf weitere Messreihen bei den finalen Messungen verzichtet wurde. Als Beispiele für die Strömungsasymmetrien werden in dem Diagramm 31 und Diagramm 32 die CO- und H₂O-Konzentrationsprofile für einen Vorversuch, welcher hier nicht näher beschrieben wird, dargestellt.

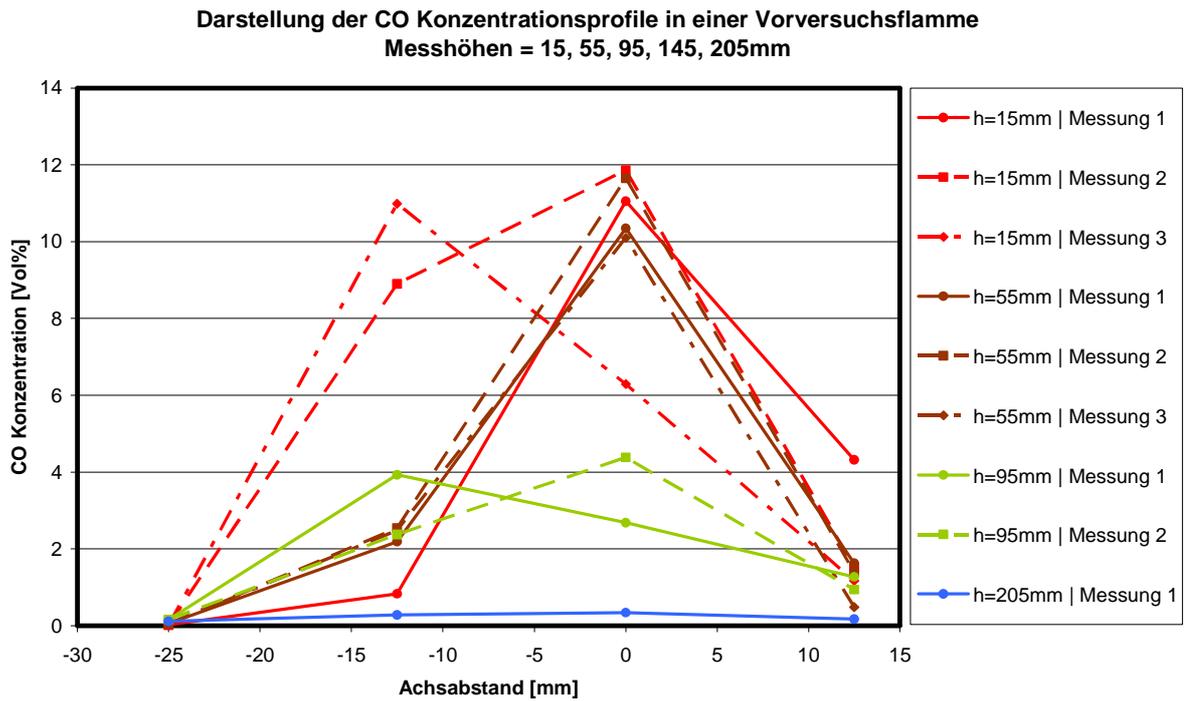


Diagramm 31: CO-Konzentration über den Achsabstand in einer Vorversuchsflamme

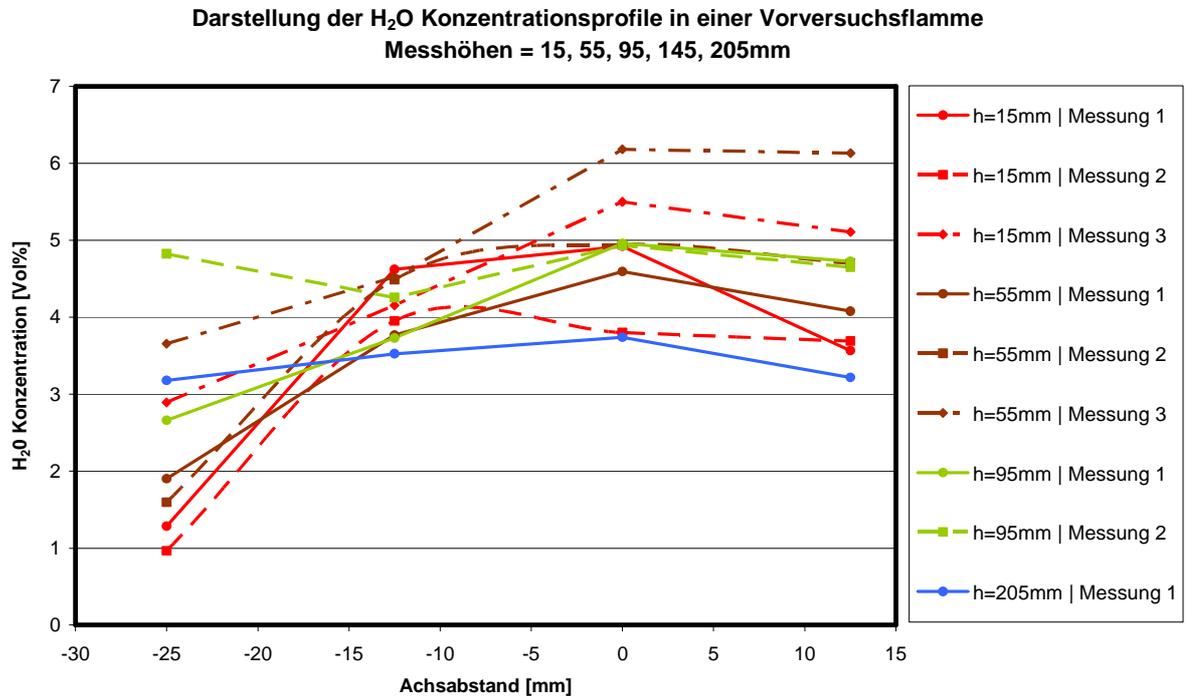


Diagramm 32: H₂O-Konzentration über den Achsabstand in einer Vorversuchsflamme

Bekannte Ursachen für die Konzentrationsänderungen bzw. Asymmetrien sind die Schiefstellung der Flamme, der Einfluss der Probenahme und der Strömungsweg bis zur Analyseein-

heit. Die Schiefstellungen der Flammen werden für die Versuchsreihen mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s, $v_{\text{Gas}}=3$ m/s und $v_{\text{Gas}}=4$ m/s mittels einer Fotokamera durch eine Reihenbildaufnahme festgehalten. Jede Bildreihe ist innerhalb von ungefähr einer Sekunde entstanden. Die Belichtungszeit für jedes Foto wurde so kurz wie möglich bei den vorhandenen Lichtverhältnissen gewählt, um die Zeitmittelung der Fotoaufnahme zu minimieren. Jedes Foto wurde mit einer Belichtungszeit von 1/50 Sekunden und ISO 1600 aufgenommen um. Die Ergebnisse werden in Abbildung 68, Abbildung 69 und Abbildung 70 dargestellt.

Man erkennt, dass eine Schiefstellung der Flamme abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit vorliegt. Die Schiefstellung ist bei $v_{\text{Gas}}=2$ m/s am stärksten und bei $v_{\text{Gas}}=4$ m/s am geringsten ausgeprägt. Außerdem zeigt sich, dass mit zunehmender Gaseintrittsgeschwindigkeit die die Flammen auch vermehrt beginnen, abzuheben.



Abbildung 68: Schiefstellung in der Flamme ohne Flammenabhebung mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s



Abbildung 69: Schiefstellung in der Flamme und teilweise Flammenabhebung mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s



Abbildung 70: Schiefstellung in der Flamme und Flammenabhebung mit $v_{\text{Gas}}=4$ m/s

Die Probenahmelanze in der Flamme wirkt als Flammenhalter und erhöht die lokale Turbulenz (siehe Abbildung 71). Die Reihenbildaufnahmen für Abbildung 71 wurden mit einer Belichtungszeit von 1/50 Sekunden und ISO 1600 aufgenommen

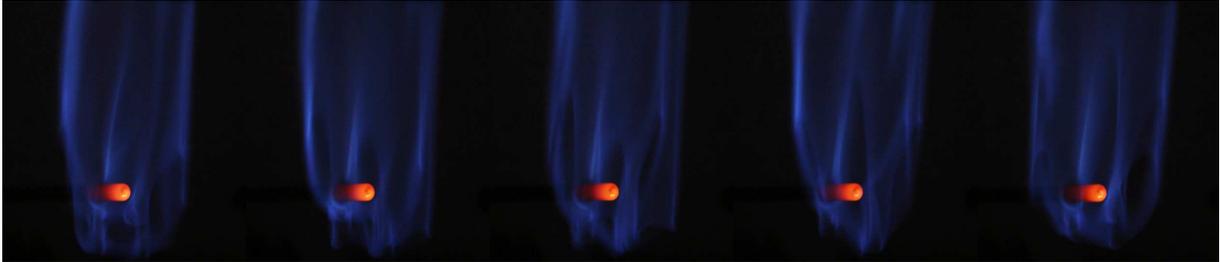


Abbildung 71: Einfluss der Probenahmelanze auf die Flammenstabilität bei $v_{\text{Gas}}=2$ m/s

Zusätzlich können am Strömungsweg zwischen der Probenahmeposition und der Analyseeinheit, trotz der beheizten Leitung auf 180 °C weitere chemische Reaktionen stattfinden, wodurch die gemessenen Spezieskonzentrationen verfälscht werden können.

Um die Messwerte auf der Messhöhe 205 mm mit den berechneten Spezieskonzentrationen für die vollständige Verbrennung vergleichen zu können und die Stoffbilanz zu prüfen, muss man für die gemessenen CO_2 -, H_2O und O_2 -Spezieskonzentrationen die Konzentrationswerte nach vollständiger Verbrennung und vollständiger Vermischung berechnen. Für die Berechnung der vollständigen Vermischung müssen Mittelwerte über die Messpositionen gebildet werden. Die Berechnung der Mittelwerte benötigt zu jeder gemessenen Spezieskonzentration die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Querschnittsfläche senkrecht zur Strömungsrichtung. Der Zusammenhang für die Mittelwertbildung bei vollständiger Vermischung in einer Strömung wird in Formel 14 dargestellt.

$$\bar{c} = \frac{A_1 \cdot v_1 \cdot c_1 + A_2 \cdot v_2 \cdot c_2 + \dots + A_i \cdot v_i \cdot c_i}{A_{\text{gesamt}} \cdot \bar{v}}$$

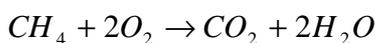
Formel 14: Konzentrationsmittelwertbildung für vollständige Vermischung in der Flamme mit Geschwindigkeitsgradienten

Erläuterung: \bar{c} ... Spezieskonzentrationsmittelwert, A_1 bis A_i ... Flächen senkrecht zur Strömungsrichtung, v_1 bis v_i ... Strömungsgeschwindigkeiten, c_1 bis c_i ... gemessene Spezieskonzentrationen, A_{gesamt} ... gesamte Fläche senkrecht zur Strömungsrichtung, \bar{v} ... arithmetisch gemittelte Strömungsgeschwindigkeit

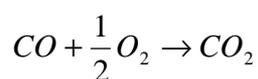
Da keine Geschwindigkeitswerte in der Flamme gemessen wurden, kann keine exakte Mittelwertberechnung durchgeführt werden. Für eine genäherte Mittelwertberechnung werden

folgende Annahmen getroffen. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind in der Flamme höher als außerhalb der Flamme. Eine Berücksichtigung der Strömungsgeschwindigkeiten führt bei der Mittelwertberechnung zu einer Gewichtung der Konzentrationen in der Flamme. Die durchströmten Flächen nehmen über den Achsabstand zu. Eine Berücksichtigung der durchströmten Flächen führt bei der Mittelwertberechnung zu einer Gewichtung die Konzentrationen außerhalb der Flamme. Da für die Mittelwertbildung keine Geschwindigkeitswerte vorliegen, würde eine Berücksichtigung von nur der durchströmten Flächen zu einer vergrößerten Mittelwertabweichung führen. Deshalb wird die genäherte Mittelwertbildung ohne Berücksichtigung der Strömungsflächen und der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt.

Hierfür wurden die Messdaten auf dem negativen Achsabstand verwendet und ab dem Achsabstand -37,5 mm mit dem Konzentrationswert des Achsabstandes -37,5 mm über den restlichen Messkammerquerschnitt ergänzt. Die Ergänzung der Messdaten beruht auf der Annahme, dass sich die Konzentrationen außerhalb des Achsabstandes von 37,5 mm nicht mehr ändern. Das Mittelwtergebnis dieser Berechnung zeigt nun die O₂-, CO₂- und H₂O-Spezieskonzentrationen bei vollständiger Vermischung, jedoch nicht bei vollständiger Verbrennung, da unverbrannte CH₄- und CO-Spezieskonzentrationen noch nicht berücksichtigt wurden. Um diese zu berücksichtigen, wurden Mittelwerte für die CH₄- und CO-Spezieskonzentrationen gebildet. Hierfür wurden die Messdaten über das jeweilige ausgeprägte Spezieskonzentrationsprofil verwendet, um die vorhandenen noch nicht verbrannte CH₄- und CO-Spezieskonzentrationen zu erfassen. Diese Konzentrationen wurden über die Annahme vollständiger Verbrennung nach Formel 15 und Formel 16 den O₂-, CO₂- und H₂O Spezieskonzentrationen zugerechnet.



Formel 15: Reaktionsgleichung für die Verbrennung von CH₄ mit O₂ zu CO₂ und H₂O



Formel 16: Reaktionsgleichung für die Verbrennung von CO mit O₂ zu CO₂

Die Ergebnisse für die O₂-, CO₂- und H₂O-Spezieskonzentration auf Basis der Messwerte bei vollständiger Verbrennung werden in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38: O₂-, CO₂- und H₂O-Spezieskonzentrationsberechnung aus Messwerten für die vollständige Verbrennung von CH₄ mit Luft

O ₂ -, CO ₂ - und H ₂ O-Konzentrationsberechnung aus Messwerten für vollständige Verbrennung						
Veruchsparameter		Messwerte			Konzentration	
Geschwindigkeit	Messhöhe	Gasspezies	Mittelwert	vollständige Verbrennung	Soll	Ist
[ms]	[mm]	[-]	[Vol%]	[-]	[%]	[%]
2	205	CH ₄	0,09	- 0,09	0	0
		CO	1,63	- 1,63	0	0
		O ₂	10,74	- 0,09 x 2 - 1,63 x 0,5	7,53	9,75
		CO ₂	5,10	+ 0,09 x 1 + 1,63 x 1	7,53	6,82
		H ₂ O	9,75	+ 0,09 x 2	15,05	9,93
3	205	CH ₄	0,58	- 0,58	0	0
		CO	2,60	- 2,60	0	0
		O ₂	10,27	- 0,58 x 2 - 2,60 x 0,5	7,53	7,82
		CO ₂	4,71	+ 0,58 x 1 + 2,60 x 1	7,53	7,89
		H ₂ O	9,29	+ 0,58 x 2	15,05	10,45
4	205	CH ₄	1,75	- 1,75	0	0
		CO	2,10	- 2,10	0	0
		O ₂	9,94	- 1,75 x 2 - 2,10 x 0,5	7,53	5,39
		CO ₂	4,77	+ 1,75 x 1 + 2,10 x 1	7,53	8,62
		H ₂ O	9,98	+ 1,75 x 2	15,05	13,48

Man erkennt, dass teilweise sehr große Abweichungen zwischen den berechneten Ist-Konzentrationen und den Soll-Konzentrationen auftreten. Da große Schwankungen in den Gasspeziesmessungen sowie große Geschwindigkeitsgradienten zwischen Flamme und der umliegenden Strömung auftreten, kann mit dieser Methode keine aussagekräftige Mittelwertbildung in der maximalen Messhöhe von 205 mm berechnet werden.

Eine zielführende Methode zur Prüfung der Stoffbilanz wäre eine Messung der Konzentrationsprofile mit FTIR und RGA in der vollständig verbrannten Strömung außerhalb der Flamme. Somit können direkt die Spezieskonzentrationsmesswerte ohne eine Verbrennungsrechnung benutzt werden und die Geschwindigkeitsgradienten in einer beruhigten Strömung vernachlässigt werden. Für diese Umsetzung empfiehlt es sich über der Absaughaube des Flammenreaktors ein ausreichend langes Kaminrohr zur Strömungsberuhigung zu installieren und vor dem Fremdlufteintrag zur Kühlung des Rauchgases eine Probenahmemöglichkeit für die Spezieskonzentrationsmessung mittels FTIR und RGA einzubauen.

Eine optische, berührungsfreie Messmethode zur Spezieskonzentrationsmessung kann Störungen bei den Probenahmen ausschließen. Viele optische Messverfahren, wie zum Beispiel das Laserinduzierte Fluoreszenz-Verfahren (LIF) oder das Photoakustische Spektroskopieverfahren (PAS) zur Konzentrations- und Temperaturmessung benötigen einen optischen Durchgang durch die zu messende Strömung. Diese Möglichkeit ist für den bestehenden

Flammenreaktor nicht gegeben, da nur ein optischer Zugang installiert ist. Es ist zu prüfen, ob berührungsfreie Messverfahren zu Konzentrationsmessung, welche ohne einen optischen Durchgang Messergebnisse generieren können, in Frage kommen. Andernfalls ist ein Umbau des Flammenreaktors auf zwei optische Zugänge anzustreben um optische Messverfahren zur Gasspezieskonzentrationsmessung mittels Durchlichtverfahren anwenden zu können.

Die Berechnung der Reynoldszahlen für die Flammenmessungen wird in Kapitel 2.4 beschrieben. Die Ergebnisse der Berechnungen werden in Tabelle 39 dargestellt. Die Reynoldszahl für Gas beschreibt den Axial-Freistrahls beim Austritt aus einem Gasverteilerrohr. Der Turbulenzumschlag zwischen laminarer und turbulenter Strömung für einen Axial-Freistrahls tritt bei Reynoldszahlen zwischen 100 und 1000 auf [3]. Folglich liegt für die Versuchsreihe mit $v_{\text{Gas}}=2$ m/s eine laminare und für die Versuchsreihen mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s und $v_{\text{Gas}}=4$ m/s eine niedrigturbulente Strömung für den Gas-Axial-Freistrahls vor.

Somit bilden alle Flammenmessergebnisse die niedrigturbulenten Strömungsvorgänge in Biomasse Rostfeuerungen ab. Die Reynoldszahlen für die Strähnen beschreiben einen Mittelwert zwischen einem Gas-Axial-Freistrahls und dem nächst gelegenen Luft-Axial-Freistrahls.

Tabelle 39: Reynoldszahlen für die Flammenversuche

Reynoldszahlen für warme Versuche bezogen auf Normbedingungen								
Geschwindigkeiten			kinematische Viskosität		Längenmaß		Reynoldszahlen	
v_{Gas}	v_{Luft}	$v_{\text{Strähne}}$	Gas	Strähne	Gas	Strähne	Gas	Strähne
[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m ² /s]	[m ² /s]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
2,00	2,54	2,27					731	4457
3,00	3,81	3,40	1,3692E-05	1,3576E-05	5,00	26,65	1095	6684
4,00	5,08	4,54					1460	8911

Da für die Messergebnisse der Spezieskonzentrationen in den Flammen große Asymmetrien vorliegen sowie die Stoffbilanz mit den vorliegenden Messwerten nicht erfolgreich geprüft werden konnte, sollen die Messwerte der Flammenmessungen nicht für die Modellierung eines CFD-Turbulenzmodells verwendet werden.

10 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel dieser Arbeit war sowohl die Konstruktion und der Bau eines Flammenreaktors und einer Gasverteilungsstation zur Erzeugung einer kalten Strömung ohne chemische Reaktion und einer Flamme mit chemischer Reaktion, als auch die Durchführung und Auswertung von Spezieskonzentrationsmessungen in der kalten Strömung und der Flamme. Im Rahmen dieser Arbeit sollte zusätzlich evaluiert werden, ob die erhalten Messwerte zur Erstellung eines Gasverbrennungsmodells für CFD-Simulationen herangezogen werden können.

Der Flammenreaktor wurde konstruiert, um eine kalten Strömung ohne chemische Reaktion und ein Flammen mit chemischer Reaktion zu erzeugen, welche die niedrig-turbulenten Strömungen über dem Brennstoffbett in Biomasse Rostfeuerungen genähert abbilden soll. Zur Untersuchung der laminaren bis schwach turbulenten Strömung sowie der auftretenden Gas- und Luftstrahlen und deren Einfluss auf den Mischungsfortschritt über dem Biomasse-Brennstoffbett wurde für den Versuchsaufbau ein Düsenkonzept zur Gas- und Luftverteilung verwendet. Die Gas- und Luftströme wurden mittels 18 Rohren in zwei konzentrischen Kreisen und einem Rohr im Zentrum verteilt. In der kalten Strömung sollen die Mischungseffekte in niedrig turbulenter Strömung sowie der Mischungsfortschritt aufgrund der Strahlenbildung, entkoppelt von chemischer Reaktion, untersucht werden. In der Flamme gilt es zusätzliche Einflüsse auf den Mischungsfortschritt, wie die Expansion des Gases und die chemischen Reaktionen, zu untersuchen. Diese Untersuchungen wurden mit einer partiell vorgemischten Flamme durchgeführt. Weiteres sollen mit den Flammenmessungen Gasphasen-Verbrennungsmodelle validiert werden. Über einen extraktiven Zugang im Reaktor können Gasproben für die Spezieskonzentrationsmessung mit RGA und FTIR entnommen werden Ein optischer Zugang im Reaktor ermöglicht das Einsetzen von berührungsfreien, optischen Messverfahren, wie zum Beispiel die Gaskonzentrationmessung mit LDA oder die Flammentemperaturmessung mit Thermographie. Da nur ein optischer Zugang vorhanden ist bedarf es optischer Messverfahren, welche aufgrund der Reflexion in der Strömung Messwerte generieren können. Dies bedeutet, dass sich die optische Aufgabeeinheit sowie die Analyseeinheit am selben Ort befinden müssen. Es ist zu prüfen ob für die optische Gaskonzentrationsmessung ein solches Verfahren besteht. Handelsübliche optische Messverfahren zur Gaskonzentrationsmessung wie zum Beispiel Laserinduzierte Fluoreszenz-Verfahren (LIF) oder das Photoakustische Spektroskopie-Verfahren (PAS) messen mit Durchlichtver-

fahren, wodurch zwei optische Zugänge im Reaktor nötig sind. Für die Verwendung dieser Messverfahren wäre ein Umbau des Flammenreaktors vorzunehmen.

Erste Vorversuche mit dem Flammenreaktor hatten gezeigt, dass Umbauten erforderlich waren, um den Falschlufteintritt zu minimieren und eine rotationssymmetrische Gas- und Luftverteilung in der Messkammer zu gewährleisten. Nach erfolgreichen Umbauten konnte der Falschlufstrom von 20 NI/min auf 0,55 NI/min reduziert werden. Es konnte eine stabile, partiell vorgemischte CH₄ Flamme bis zu einer Gasströmungsgeschwindigkeit beim Eintritt in den Reaktor von 4 m/s erzeugt werden.

Für die Messungen wurden Versuche mit Normgasgeschwindigkeiten beim Eintritt in den Flammenreaktor von 2, 3, und 4 m/s gewählt. Im Flammenreaktor wurden FTIR- und RGA-Spezieskonzentrationsmessungen sowie LDA-Gasgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Die LDA-Messungen wurden im Rahmen der Vorversuche durchgeführt und aus Zeitgründen bei den finalen Messungen nicht angewendet.

Die Messergebnisse der kalten Messungen, mit einem CO₂/N₂-Gasgemisch und einem Luftstrom, liefern für die RGA-Messung rotationssymmetrische CO₂- und O₂-Konzentrationsprofile. Die Messungen zeigen, dass die unterschiedlichen Gaseintrittsgeschwindigkeiten zwischen $v_{\text{Gas}}=2$ m/s und $v_{\text{Gas}}=4$ m/s keinen relevanten Einfluss auf den Mischungsfortschritt in einer Messhöhe von 205 mm haben. Die Konzentrationsmessergebnisse, konnten erfolgreich mittels einer Bilanzierung geprüft werden. Hierfür wurden die Messergebnisse einer Messposition mit fast vollständiger Vermischung mit der berechneten vollständigen Mischkonzentration verglichen. Die Messergebnisse der kalten Strömungen bilden mit den Gasgeschwindigkeiten von 2, 3, und 4 m/s sowie mit den Reynoldszahlen zwischen 800 und 9000 die laminaren bis niedrigturbulenten Strömungen über dem Brennstoffbett in Biomasse-Rostfeuerungen ab. Diese Ergebnisse zeigen, dass Konzentrationsmessungen für kalte Messungen mit diesem Flammenreaktor korrekte Werte liefern, die zur Validierung von Mischungsmodellen und zur Erstellung eines Strahlenmodells für CFD-Simulationen herangezogen werden können. Messungen aus den Vorversuchen zeigen, dass das LDA-Messverfahren zur Gasgeschwindigkeitsmessung in kalten Strömungen aussagekräftige Messwerte liefert. Zusammengefasst können die Messverfahren FTIR, RGA und LDA für Messungen in kalten Strömungen empfohlen werden.

Die Messergebnisse der Flammenmessungen, mit einem CH₄/Luft-Gasgemisch und einem Luftstrom, liefern mit RGA- und FTIR-Messungen nicht reproduzierbaren Ergebnisse inner-

halb der Flamme und weisen große Gasspeziesasymmetrien in der Flamme auf. Diese Ergebnisse sind grundsätzlich auf die Schiefstellung und dem teilweisen Abheben der Flammen sowie dem Einfluss der Probenahme mittels einer Probenahmelanze zu erklären. Die Messergebnisse zeigen, dass die Gas- und Lufteintrittsgeschwindigkeiten mit dem Verbrennungsfortschritt von CH_4 gekoppelt sind. Die Konzentrationen von CH_4 nehmen über die Höhe mit Zunahme der Eintrittsgeschwindigkeit zu. In der höchsten Messebene 205 mm ist das CH_4 -Gas bei $v_{\text{Gas}}=2$ m/s nahezu vollständig verbrannt, wohingegen bei den Versuchsreihen mit $v_{\text{Gas}}=3$ m/s und $v_{\text{Gas}}=4$ m/s noch CH_4 -Konzentrationsprofile bestehen. Die Messergebnisse der Flammenmessungen konnten mit den vorhandenen Messwerten nicht vollständig auf Plausibilität mittels einer Stoffbilanz geprüft werden. Die vorliegenden Ergebnisse der Flammenmessungen können somit nicht zur Validierung eines Gasphasen-Verbrennungsmodells herangezogen werden. Für eine Stoffbilanzprüfung der Verbrennung mittels FTIR und RGA sind Messungen nach vollständiger Verbrennung in einer ausgebildeten Strömung notwendig. Für diese Umsetzung empfiehlt es sich über der Absaughaube des Flammenreaktors ein ausreichend langes Kaminrohr zur Strömungsberuhigung zu installieren und vor dem Fremdlufteintrag zur Kühlung des Rauchgases eine Probenahmemöglichkeit für die Spezieskonzentrationsmessung mittels FTIR und RGA einzubauen.

Für weiterführende Flammenmessungen im Flammenreaktor sind optische, berührungslose Messverfahren mit hoher Messauflösung zu empfehlen. Geschwindigkeitsmessungen in Flammen können mittels des LDA-Verfahrens über den bestehenden optischen Zugang im Flammenreaktor durchgeführt werden. Es ist zu bedenken, dass dieses Messverfahren eine Aufgabereinheit für Seeding-Feststoffpartikel für die Flamme sowie eine Abscheideeinheit dieser Partikel aus dem Abgasstrom benötigt. Abhängig von der Partikelkonzentration in der Flamme benötigt ein aussagekräftiger Messpunkt durchschnittlich ungefähr 2 Minuten Messzeit. Das Messvolumen liegt im Mykrometerbereich. Deshalb ist für eine aussagekräftige Geschwindigkeitsmessung eine sehr hohe Auflösung im Millimeterbereich zu wählen, wodurch dieses Messverfahren sehr zeitaufwändig ist. Möglichkeiten zur Konzentrationsmessung mit optischen Verfahren sind bezüglich des notwendigen optischen Zugangs zu evaluieren. Für den Flammenreaktor liegt ein optischer Zugang vor. Optische Messverfahren, wie zum Beispiel das Laserinduzierte Fluoreszenz-Verfahren (LIF) oder das Photoakustische Spektroskopie-Verfahren (PAS) zur Konzentrationsmessung, basieren auf Durchlichtverfahren, wodurch zwei optische Zugänge zum Messbereich benötigt werden. Für das Einsetzen von optischen Durchlichtverfahren muss ein Umbau des Flammenreaktors vorgenommen

werden. Eine quantitative Temperaturbestimmung des Flammenprofils kann über den bestehenden optischen Zugang im Flammenreaktor mittels Thermographie vorgenommen werden. Es stehen zwei Verfahren zur Auswahl. Das Infrarot-Thermographie Verfahren benötigt eine IR-Kamera mit einem optischen CO_2 Filter, welche das CO_2 -Eigenleuchten in der Flamme fotografiert. Ein weiteres Verfahren basiert auf der Fotografie mit einer handelsüblichen Fotokamera des blauen Eigenleuchtens von CH-Radikalen in Flammen. Die Fotodaten können mittels Computerprogramm in qualitative Temperaturprofile umgerechnet werden [19,30]. Wenn die Flamme nicht rotationssymmetrisch ist, müssen Fotos aus mehreren Winkeln aufgenommen werden. Im Flammenreaktor können nur rotationssymmetrische Flammen untersucht werden, da über den bestehenden optischen Zugang, Fotos nur aus einer Richtung möglich sind. Durch Messung einer Referenztemperatur in der Flamme, können die qualitativen Temperaturprofile in quantitative Profile transformiert werden.

11 Quellenverzeichnis

- ¹ ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE VERBAND, <http://www.biomasseverband.at/biomasse/statistik/energie-und-klima/#element1457>, abgerufen am 14.09.2012
- ² ÖSTERREICHISCHER BIOMASSE VERBAND, Ökoenergie, Heft 77, 19.Jahrgang, Dezember 2009/ Jänner 2010, Seite 24
- ³ DINKELACKER F., LEIPERTZ A., Einführung in die Verbrennungstechnik, Esytec Verlag Erlangen 2007, Kapitel 5
- ⁴ WIKIPEDIA, <http://de.wikipedia.org/wiki/Vormischflamme#Vormischflamme>, abgerufen am 14.09.2012
- ⁵ VAN BASSHUYSEN/ SCHÄFER (Hrsg), Handbuch Verbrennungsmotor, 4.Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2007, ISBN 978-3-8348-0227-9
- ⁶ PETERS N., Technische Verbrennung, 20.Oktober 2006, Institut für Technische Verbrennung, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- ⁷ ROTTA J. C., Turbulente Strömungen, Teubner, Stuttgart 1972
- ⁸ BLECHER L., Grundlagen der Verfahrenstechnik – Kapitel D: Disperse Systeme Version 0907, Hochschule Heilbronn, Studiengang Verfahrens- und Umwelttechnik
- ⁹ DEUTSCHER ENERGIEHOLZ- UND PELLET-VERBAND e.V. (DEPV), <http://www.depv.de/holzpellets/pellets/normen/>, abgerufen am 01.10.2012
- ¹⁰ MEHRABIAN R., SCHARLER R., OBERNBERGER I., 2011: Effects of pyrolysis conditions on the heating rate in biomass particles and applicability of TGA kinetic parameters in particle thermal conversion modelling. in: Fuel - the science and technology of Fuel and Energy, Volume 93, March 2012, ISSN 0016-2361 page 574
- ¹¹ SCHULZE K., SCHARLER R., OBERNBERGER I., 2011: Development of an advanced CFD model for ash deposit and aerosol formation in biomass fired boilers. in: proceeding of the 9th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, April 2011, Estoril, Portugal, Centertec (Ed.), Portugal
- ¹² SCHARLER R., BENESCH C., OBERNBERGER I., 2011: CFD-Simulationen als innovatives Werkzeug für die Entwicklung und Optimierung von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen und Kaminöfen. In: Tagungsband der Mitteleuropäischen Biomassekonferenz, Jänner 2011, Graz, Österreich, Österreichischer Biomasse Verband
- ¹³ SCHARLER R., OBERNBERGER I., Deriving guidelines for the design of biomass grate furnaces with CFD analysis - a new Multifuel-Low-NO_x furnace as example. in: proceeding of the 6th International Conference on Industrial Furnaces and Boilers, April 2011, Estoril, Portugal
- ¹⁴ THOME-KOZMIENSKY K. J., BECKMANN M., Erhöhung der Energieeffizienz bei Abfallverbrennungsanlagen durch Prozessführung und Anlagenschaltung, März 2006, EcoEnergy Gesellschaft für Energie und Umwelttechnik mbH Walkenried
- ¹⁵ WIKIPEDIA, <http://de.wikipedia.org/wiki/Fourier-Transformations-IR-Spektroskopie>, abgerufen am 04.02.2010
- ¹⁶ GRIFFITHS P. R., DE HASETH J. A., Fourier Transform infrared spectrometry (2nd edn.), Springer Verlag 2008
- ¹⁷ EMERSON PROCESS MANAGEMENT GmbH & CO. OHG, Instruction Manuel 90002929 04/2008, NGA 2000 Hardware Manuel for MLT or CAT 200 Analyzer and MLT or CAT 200 Analyzer Module
- ¹⁸ WIKIPEDIA, <http://de.wikipedia.org/wiki/Laserdoppler-Anemometrie>, abgerufen am 04.02.2010
- ¹⁹ WOISETSCHLÄGER J., Energie- und umwelttechnisches Meß- und Versuchswesen. Teil: Optische Messtechnik, Lasertechnik. Vorlesung:307.015, Laborübung: 307.018, TU Graz, 2007
- ²⁰ SAXONIA EDELSTAHLTECHNIK UND -HANDELS GmbH; <http://www.saxonia-edelstahl.de/>, abgerufen am 16.02.2010

- 21 SCHÄFER C., www.primus-ofenshop.de, Telefonische Auskunft Februar 2010
- 22 KAYS W. M., CRAWFORD M. E., Convective heat and mass transfer, McGraw-Hill, New York, 1980
- 23 HERING E., MARTIN R., STOHRER M., Taschenbuch der Mathematik und Physik, 5.Auflage, Springer Verlag, ISBN 978-3-540-78683-2
- 24 WIKIPEDIA, http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffmonoxid#cite_note-25, abgerufen am 23.03.2010
- 25 CONTRAT-PROJEKT.DE, <http://www.enius.de/schadstoffe/kohlenmonoxid.html>, abgerufen am 23.03.2010
- 26 HU & SPEIZER, Harrison's Principles of Internal Medicine, McGraw-Hill, New York City, 14th edition
- 27 VÖGTLIN INSTRUMENTS AG - FLOW TECHNOLOGY, http://www.voegtlin.com/produkte/gas/massedurchfluss_smart_series.html, abgerufen am 30.10.2012
- 28 TEMET INSTRUMENTS OY, Instruction & Operating Manuel 2002-09-10, Gasmeter™ DX-Series FT-IR Gas Analyzer
- 29 VÖGTLIN INSTRUMENTS AG - FLOW TECHNOLOGY, http://voegtlin.sharepointhosting.ch/DOCUMENTS/139-2012_de_infoV100.pdf, abgerufen am 30.10.2012
- 30 GIULIANI F., WOISETSCHLÄGER J., LEITGEB T., Design and Validation of a burner with variable geometry for extended combustion range. in: proceedings of ASME Turbo Expo 2012, June 2012, Copenhagen, Denmark