

Regelung von Biomassefeuerungen durch Messung von Luftzahl und Kohlenmonoxidkonzentration

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Jan Bischof
aus Neu-Ulm

Hauptberichter:	Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. G. Baumbach
Mitberichter:	Prof. Dr. Andreas Kronenburg
Tag der mündlichen Prüfung:	06.07.2016

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart
Abteilung Reinhaltung der Luft

2017

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des GREES-Stipendiums der Universität Stuttgart und wurde am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik an der Universität Stuttgart, sowie Bioenergy2020+ in Graz bearbeitet. Besonderer Dank gilt an den betreuenden Herrn Apl. Prof. Dr. habil. Baumbach durch den diese Arbeit ermöglicht wurde und mir im Verlauf der Dissertation sowohl persönlich als auch fachlich mit Ratschlägen bei Seite stand. Des weiteren möchte ich mich für die Bereitschaft von Herrn Prof. Dr. Andreas Kronenburg dafür bedanken, sich kritisch mit meiner Arbeit auseinander zusetzen und die Aufgabe des Zweitgutachters übernommen hat.

Stellvertretend für alle Kollegen des IFK und Bioenergy2020+ geht besonderer Dank für die Unterstützung an Dr. Markus Göllles, Winfred Juschka und Dr. Christian Schäfer sowie Julia Goy und Patricia Winter für ihre Ratschläge, die kritischen Diskussionen und das angenehme Arbeitsklima während der Dissertation. Besonderer Dank an meine langjährigen Freunde Ioannis Argiriadis, Paul Milbaier und Jens Henzler, welche mir während der Promotion immer bei Seite standen.

Stuttgart, den 15. Januar 2017

Jan Bischof

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Potentiale neuer Kohlenmonoxidsensorik zur Regelung automatisch beschickter Biomassefeuerungen im kleinen Leistungsbereich. Ausserdem wird ein neuartiges Konzept zur Regelung von Biomassekleinfeuerungsanlagen vorgeschlagen. Das Regelsystem basiert auf gleichzeitiger Messung von Sauerstoff und Kohlenmonoxid und ist in der Lage, die Anlage automatisiert in den emissionsoptimalen Arbeitspunkt zu fahren. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen wird nicht ein lokaler Gradient der CO-O₂-Charakteristik bestimmt, sondern die CO-O₂-Charakteristik global geschätzt. Hierfür wurde ein Kalmanfilter eingesetzt, um die Parameter einer zuvor gewählten Basisfunktion zu schätzen. Neben der detaillierten Beschreibung des neuen Konzeptes enthält die vorliegende Arbeit eine umfangreiche Validierung des Regelkonzeptes an typisch auftretenden Störgrößen, wie wechselnde Brennstoffwassergehalte, Sensordrift, Falschlufteintrag und wechselnde Feuerungsleistung. Die Experimente mit typischen Lastzyklen zeigen beispielsweise, dass die Vorgabe der optimalen Sauerstoffkonzentration bei verschiedenen Leistungen durch einen CO-O₂-Regelkreis nicht mehr notwendig ist. Für jede Leistung wird in Echtzeit die optimale Sauerstoffkonzentration durch die CO-O₂-Schätzer bestimmt. Zudem wiesen die Experimente nach, dass sich die CO-Emissionen im Vergleich zu Referenzmessungen deutlich verbessern. Experimente mit künstlicher Falschluf und Sensordrift zeigten, dass die auftretende Verschiebung der CO-λ-Charakteristik vom CO-O₂-Schätzer erkannt und der Sauerstoffsollwert entsprechend angepasst wird, um die auftretende Störung zu kompensieren. Für die Praxis bedeutet dies, dass negative Auswirkungen der Lambdasonde durch das neue Regelkonzept deutlich reduziert werden können, da beispielsweise auch stark driftende Sauerstoffmessungen durch das CO-O₂-Regelkonzept ausgeglichen werden können. Vergleichsmessungen zeigen, dass eine deutliche Verbesserung des Ausbrandes durch den CO-O₂-Schätzer erreicht werden kann. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass eine Veränderung des Brennstoffwassergehaltes detektiert und der Arbeitspunkt entsprechend angepasst werden kann.

Im Allgemeinen zeichnet sich der neue Regelalgorithmus durch eine hohe Robustheit aus und ist in der Lage Änderungen der Verbrennungsbedingungen innerhalb weniger Minuten auszugleichen. Damit stellt das neue Regelkonzept eine wertvolle Verbesserung existierender Regelstrategien dar. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass CO-O₂-Regelsysteme eine sinnvolle und technologisch realisierbare Alternative zu klassischen sauerstoffgeführten Regelsystemen darstellen.

Abstract

The present study examines the potential of new carbon monoxide sensors for controlling automatically feeded small-scale biomass firing systems. This work presents a novel control concept for these biomass firing systems based on simultaneous measurements of oxygen and carbon monoxide. The new control system is able to optimize the excess air ratio of the combustion process in real-time in order to minimize the resulting emissions. Unlike previous approaches, there is no need for a direct estimation of a local gradient of the CO-O₂-characteristic. Instead, the new approach is globally estimating the CO-O₂-characteristic. A Kalman filter is used to determine the parameters of a previously selected base function. In addition to the detailed description of the new concept, this work contains an extensive validation of the control concept for typical disturbances, such as changing fuel moisture contents, sensor drifts, air leakage and changing load demands. The experiment for typical load cycles demonstrates that the predetermined set points of the oxygen set point for different loads is no longer necessary. The emission-optimal oxygen concentration is determined by the new CO-O₂-controller in real time during the combustion. This leads to a strong decrease of the resulting emissions. The results of experiments with false air and artificial sensor drift show, that a shift of the CO-O₂-characteristic can be detected and compensated by the new control system. This means for practical applications that for example the negative influence of a drifting lambda probe can be reduced. A comparison to measurements without the new control system demonstrates that the new controller leads to a considerable improvement of the burnout quality. Additionally, this work shows that the new controller is able to adapt the oxygen working point according to the current fuel moisture content.

In general, the controller is characterized by a high robustness and is able to adapt the oxygen concentration within a few minutes. The new control system is a valuable improvement of existing control strategies and this work demonstrates that CO-O₂-control strategies are a promising alternative to classical oxygen based concepts.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Einführung und Motivation	1
1.2 Gliederung der Arbeit	3
2 Ausgangssituation	5
2.1 Biomassefeuerungen im kleinen und mittleren Leistungsbereich	5
2.2 Ablauf der Holzverbrennung	7
2.3 Zusammenhang zwischen Emissionen und Luftzahl	8
2.4 Stand der Technik und Forschung	17
2.4.1 Stand der Technik der Regelung von Biomassefeuerungen	18
2.4.2 Stand der Forschung von sauerstoffbasierten Regelungen	21
2.4.3 Stand der Forschung von kohlenmonoxidbasierten Regelungen	22
2.5 Bestehender Forschungsbedarf	27
3 Methodik	29
3.1 Messwerterfassung	29
3.1.1 Eingesetzte Insitu-CO-Sensorik	30
3.1.2 Luftmassenstrommessung	33
3.2 Eingesetzte Hackschnitzelrostfeuerung	34
3.3 Regelungstechnische Definitionen und Begriffe	34
3.4 Zeitlich hochaufgelöste CO- λ -Charakteristik	36
4 Regelung durch Kohlenmonoxid- und Sauerstoffmessung	39
4.1 Anforderungen an CO-basierte Regelkonzepte	39

4.2	Bewertungsmaßstab für den Regler	41
4.3	Simulationsumgebung zur Vorvalidierung des Regelkonzeptes	42
4.4	Optimaler Arbeitspunkt der Verbrennungsregelung	51
4.5	Vorteile der CO-O ₂ -Regelung im Vergleich zur reinen sauerstoffbasierten Regelungen	53
4.6	Vorteile der CO-O ₂ -Regelung im Vergleich zur reinen CO-Regelungen	54
4.7	Vergleich verschiedener Ansätze zur CO-O ₂ -Regelung	55
4.7.1	Gradientenbasierte Ansätze	55
4.7.2	Datenbasierte Ansätze	60
4.7.3	Neues Konzept basierend auf der Echtzeitschätzung der Charakteristik	60
4.8	Funktionsweise des CO-O ₂ -Reglers	61
4.8.1	Funktionsweise des Kalmanfilters	64
4.8.2	Formfilter	67
4.8.3	Bestimmung des optimalen Arbeitspunktes	67
4.8.4	Tiefpassfilter zur Glättung des Sauerstoffsollwertes	68
4.8.5	Erweiterungspoteniale	68
4.8.6	Eingesetzter Sauerstoffregelkreis	69
4.9	Besonderheit des Bezuges der CO-Emissionen auf eine Sauerstoffkonzentration	72
5	Validierung des neuen Regelkonzeptes	75
5.1	Einführendes Beispiel zum Start der Regelstrategie	75
5.2	Experimentelle Validierung unter Einfluss von Störgrößen	79
5.2.1	Einstellungen für die Validierung CO-λ-Schätzer	79
5.2.2	Lastzyklen	81
5.2.3	Eintrag von Falschlufte	86
5.2.4	Änderung des Brennstoffwassergehaltes	88
5.2.5	Sensordrift	92
6	Zusammenfassung der Schlussfolgerungen	97

Abkürzungsverzeichnis

Acronyme	Erläuterung
APRBS	Amplitude Modulated Pseudo Random Binary Sequences
BImSchV	Bundes-Immisionsschutzverordnung
EKF	Extended Kalman Filter
GPS	Global Positioning System
KF	Kalman Filter
MBR	Modelbasierte Regelung
PID	proportional - integral - derivative
TL	Teillast
VL	Volllast
Index	Erläuterung
<i>Brst</i>	Brennstoff
<i>k</i>	<i>k</i> -ter Zeitschritt
<i>opt</i>	optimale Größe
<i>p</i>	Primärluft
<i>RGA</i>	gemessen mit Rauchgasanalytik
<i>s</i>	Sollwert
	sekundär
<i>sim</i>	simulierter/deterministischer Anteil
<i>stoch</i>	stochastischer Anteil

Variablen		Erläuterung
β	-	dimensionsloser Parameter
λ, λ_g	-	globale Luftzahl
λ_p	-	primäre Luftzahl
$\lambda_{Falschluft}$	-	Falschluftmassenstrom bezogen auf stöchiometrisch notwendigen Luftmassenstrom
$c_{O_2, RGA}$	Vol. – % d.b.	Sauerstoffsignal der Rauchgasanalytik (trocken)
$c_{O_2, opt}$	Vol. – % w.b.	Geschätzte optimale Sauerstoffkonzentration (feucht)
$c_{O_2, s}$	Vol. – % w.b.	Sollwert der Sauerstoffkonzentration
$c_{O_2, drift}$	mg/m ³ w.b.	O ₂ -Konzentration der KS1D gemessen mit driftendem Sensor
c_{CO}	mg/m ³ w.b.	CO-Konzentration der KS1D (feucht)
$c_{CO, drift}$	mg/m ³ w.b.	CO-Konzentration der KS1D unter Einfluss von Sensoroffset (feucht)
f	-	Basisfunktion für den Parameterschätzer
m	kg/s	Massenstrom
m_{Brst}	kg/s	Brennstoffmassenstrom
p	-	Parametervektor für Basisfunktion
u_k	-	präzidiertes Systemzustand zum Zeitpunkt k
w_{H_2O}	%	Brennstoffwassergehalt
x_k	-	Systemzustand zum Zeitpunkt k
\hat{x}_k	-	präzidiertes Systemzustand zum Zeitpunkt k
y_k	-	Systemausgang zum Zeitpunkt k
A		Amplitudenspektrum
\hat{A}	-	einseitiges Amplitudenspektrum
A	-	Systemmatrix
C	-	Ausgangsmatrix
F	-	Transitionsmatrix/Systemmatrix für den Übergang von Zeitpunkt k nach $k + 1$
K	-	Kalmangain
T_R	°C	Rücklauftemperatur
T_V	°C	Vorlauftemperatur
\dot{Q}	kW	Leistung der Feuerung
X		stochastische Größe

1 Einleitung

1.1 Einführung und Motivation

Holz gewinnt als erneuerbarer Energieträger zunehmend an Bedeutung und wird auch langfristig zu einer nachhaltigen Energieversorgung beitragen. Während momentan der Nutzung von Holz für die Produktion von Treibstoff und Strom praktisch keine Bedeutung zukommt, kommt der direkten Nutzung von Holz zur Wärmeengewinnung, sei es zum Heizen oder zur Warmwasserversorgung, eine immer wichtigere Rolle zu [1, 2]. Die direkte thermische Nutzung in Kleinfeuerungsanlagen macht hierbei – gemessen am Primärenergieverbrauch – den größten Anteil aus und auch in Zukunft werden Kleinfeuerungsanlagen zur Raumwärmeversorgung eine wichtige Rolle spielen.

Gesetzliche Emissionsgrenzwerte und die gesellschaftspolitische Debatte um das Emissionsverhalten von Biomassekleinfeuerungsanlagen, erzwingen die bestehende Anlagentechnik weiter zu optimieren. Wie Abbildung 1.1 verdeutlicht, existieren verschiedene Möglichkeiten zur Optimierung von Biomassekleinfeuerungsanlagen. Eine der wichtigsten Möglichkeiten zur Verbrennungsoptimierung stellt die Optimierung der Feuerstätte selbst dar. Hierbei steht typischerweise die Geometrieoptimierung im Vordergrund. Moderne Methoden wie numerische Strömungsmechanik (CFD) [3, 4, 5] und Particle Image Velocimetry (PIV) [6] werden neben *try-and-error*-Methoden eingesetzt, um die wichtigen Parameter, wie beispielsweise Verweilzeit, Durchmischung und Temperatur, einer Feuerungsanlage zu optimieren. Auch sekundäre Maßnahmen, wie der Einsatz elektrischer Partikelfilter [7], Gewebefilter [8] oder Katalysatoren [9, 10] zur Emissionsreduktion sind in den letzten Jahren Gegenstand vieler wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen. Das folgende Jahrzehnt wird vermutlich zeigen, welche dieser Sekundärmaßnahmen sich für Biomassekleinfeuerungsanlagen durchsetzen wird.

Zahlreiche Studien [11, 12, 13, 14] der letzten Jahre zeigen außerdem, dass erhebliche Unterschiede zwischen dem Betrieb in der Praxis und am Prüfstand existieren. Unter praxisähnlichen Bedingungen weisen viele Biomassekleinfeuerungen Emissionen auf, welche sich um bis zu eine Größenordnung von zuvor an Prüfständen bestimmten Messwerten unterscheiden. Hierfür ist maßgeblich die Betriebsweise verantwortlich, welche sich für alle Klassen von Kleinfeuerungsanlagen stark zwischen Prüfstand und Praxis unterscheidet. Fortgeschrittene Regelungstechnik ist hier in der Lage, den (meist negativen) Einfluss des

Anwenders und dessen Betriebsweise auf ein Minimum zu reduzieren und das Emissionsverhalten sowie den Wirkungsgrad zu verbessern. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dieser Methode zur Emissionsreduktion – nämlich der Verbesserung der Regelung des Biomasseverbrennungsprozesses.

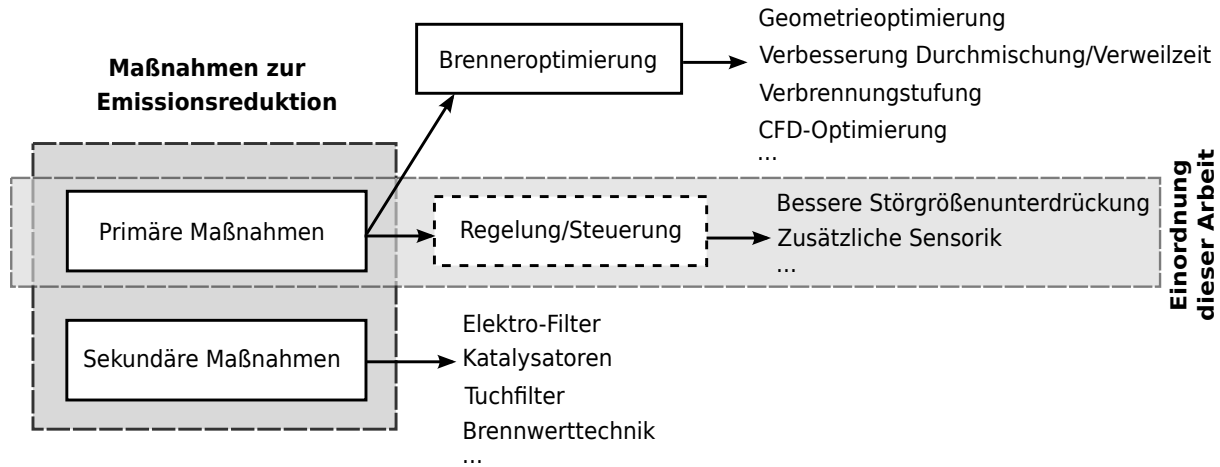


Bild 1.1: Möglichkeiten zur Emissionsreduktion bei Biomassekleinfeuerungsanlagen für verschiedenste Schadstoffe.

Die wichtigste Einflussgröße auf die Qualität von Verbrennungsprozessen ist die Luftzahl λ , welche für die Vollständigkeit der Verbrennung und diverser anderer Qualitätsmerkmale von elementarer Bedeutung ist. Konventionelle Regelkonzepte für Biomassekleinfeuerungen basieren meist auf der Regelung dieser Luftzahl λ . Diese Regelungen sind strukturell einfach aufgebaut und implizieren eine Reihe weiterer Vorteile. Jedoch auch einige markante Schwachpunkte dieser sauerstoffgeführten Regelungen liegen auf der Hand. Die optimale Luftzahl eines Verbrennungsprozesses ist betriebsbedingt von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Im Gegensatz zu genormten Brennstoffen wie Gas und Öl, zeichnet sich die Biomasse gerade durch ihre Diversität aus¹. Sowohl die Brennstoffqualität, wie auch Heizwert und Brennstofffeuchte können bei biogenen Brennstoffen stark variieren. Hersteller von Biomassekleinfeuerungen sind oftmals gezwungen ihre Feuerungen mit sehr konservativen Einstellungen zu betreiben um die variierenden Eigenschaften der zu verfeuernden Brennstoffe kompensieren zu können. In vielen Fällen ergeben sich hierdurch erhöhte Emissionen und verringerte Wirkungsgrade.

Als klassischer *Tracer* für die Verbrennungsqualität von Biomassekleinfeuerungsanlagen wird in der Literatur häufig der Kohlenmonoxidgehalt herangezogen. Dieser weist eine besondere Eignung als Tracer auf, da eine relativ eindeutige Korrelation zwischen diverser Emissionen (PM_{10} , organische Kohlenstoffemissionen, Kohlenwasserstoffe, PAK's...) und dem Kohlenmonoxidgehalt im Abgas [15] besteht. Hinzu kommt der Umstand, dass wenn

¹ Aktuelle Trends deuten darauf hin, dass sich die Diversität der Brennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen weiter vergrößern wird.

Kohlenmonoxid im Abgas vollständig oxidiert ist, in nahezu allen Fällen davon ausgegangen werden kann, dass die Kohlenwasserstoffe bereits ebenfalls vollständig oxidiert sind. Dies legt die Idee nahe, zusätzliche insitu-CO-Gassensorik einzusetzen, um nicht nur indirekt über die Lambdasonde eine Aussage über die Verbrennungsqualität machen zu können, sondern auch direkt die Verbrennungsqualität „zu messen“. Die Idee wurde bereits vor einigen Jahrzehnten formuliert [16], scheiterte in der Praxis bis vor wenigen Jahren an zwei entscheidenden Problemen:

Mangel an geeigneter Sensorik: Erst in letzten Jahren sind deutliche technologische Fortschritte für praxistaugliche Gassensoren erzielt worden. Heute ist geeignete Kohlenmonoxidsensorik am Markt verfügbar und eröffnet damit der Regelung von Kleinfeuerungsanlagen neue Optionen.

Mangel an geeigneter Regelungstechnik: Ein weiteres Problem, welches bis heute existiert, ist, dass schlichtweg keine geeigneten Regelstrategien zur Verwendung dieser Sensorik existieren. In der Literatur beschriebene Algorithmen benötigen lange Optimierungsintervalle, um die optimale Luftzahl zu bestimmen oder weisen nicht die erforderliche Robustheit gegenüber dem stochastischem Verhalten des Verbrennungsprozesses auf.

Wie eben erwähnt, hat die Gassensorik in den letzten Jahren deutliche Fortschritte gemacht und zahlreiche Studien [17, 18, 19] weisen daraufhin, dass heutzutage markterhältliche CO-Sensoren sich für den Einsatz in Biomassekleinfeuerungen eignen. Da momentan nahezu ausschließlich kleine Stückzahlen produziert werden, sind die Stückkosten der Sensorik noch relativ hoch. Es ist jedoch zu erwarten, dass sich die Sensorik in den nächsten Jahren, auch wirtschaftlich für kleine Biomassefeuerungen als interessant entwickelt. Auf Seiten der notwendigen Regelungstechnik bestehen zur Zeit noch erhebliche Defizite und wie später gezeigt wird, sind die meisten bisherigen Algorithmen der Regelungsstrategie als unzureichend zu bewerten.

Diese Arbeit soll ein wichtiges Puzzleteil beitragen und eine Möglichkeit aufzeigen, wie Kleinfeuerungsanlagen mittels CO bzw. mittels Kombination aus CO und O₂ geregelt werden können.

1.2 Gliederung der Arbeit

Diese Arbeit ist in fünf Kapitel unterteilt. Im ersten Kapitel „Einleitung“ (1) wird eine Einführung ins Themengebiet gegeben und die Aufgabenstellung der Arbeit illustriert. Das zweite Kapitel „Ausgangssituation“ (2) beschreibt die notwendigen verbrennungstechnischen Grundlagen und den Stand der Technik. Im dritten Kapitel „Methodik“ (3) werden die verwendete Sensorik illustriert, der Messaufbau erläutert und wichtige regelungstechnische Begriffe definiert. Im vorletzten Kapitel „CO- λ -Regelung“ (4) wird auf

das neue Regelungskonzept eingegangen, welches sowohl die Sauerstoffkonzentration als auch die Kohlenmonoxidkonzentration zur Regelung der Feuerung verwendet. Ergebnisse an einer Hackschnitzelanlage verdeutlichen zudem Vor- und Nachteile und dienen der Validierung des Konzeptes. Abschließend werden in Kapitel 6 „Zusammenfassung und Ausblick“ die durch diese Arbeit gesammelten Erkenntnisse resümiert und noch offene Fragestellungen ausgeführt. Abbildung 1.2 erläutert den Inhalt dieser Arbeit mittels eines Flussdiagrammes.

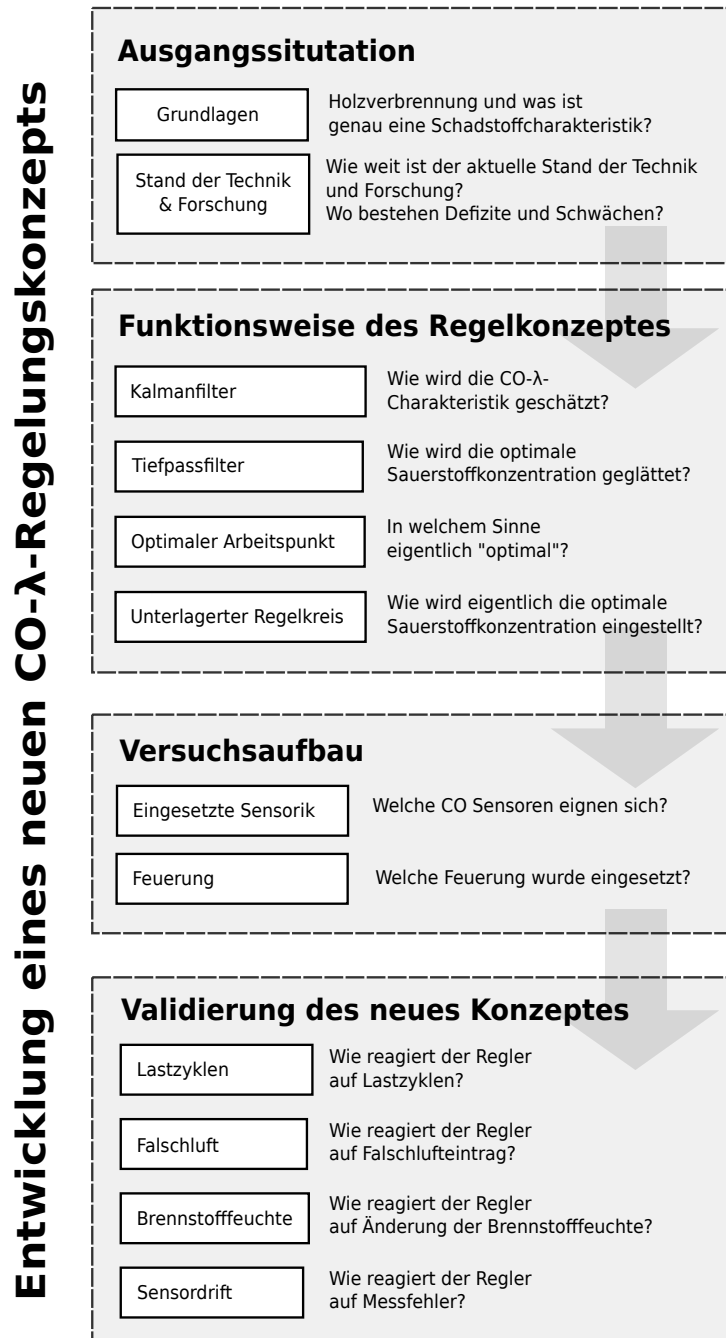


Bild 1.2: Zusammenfassende Übersicht über diese Arbeit.

2 Ausgangssituation

2.1 Biomassefeuerungen im kleinen und mittleren Leistungsbereich

Kleinfeuerungsanlagen werden grundsätzlich in die beiden Kategorien hand- und automatischbeschickt unterteilt. Während bei handbeschickten Anlagen der Brennstoff diskontinuierlich durch den Anwender mit Brennstoff versorgt wird, erfolgt bei automatischbeschickten der Brennstoffeintrag kontinuierlich durch eine dafür vorgesehene Förderung. Ob der Verbrennungsprozess batchweise oder kontinuierlich abläuft, spielt für den zeitlichen Verlauf der Verbrennung eine entscheidende Rolle. Während kontinuierlich betriebene Anlagen nur geringfügigen stochastischen Schwankungen unterliegen, treten bei den sogenannten *Chargenabbränden* charakteristische Abbrandverläufe auf [1, S.468].

Automatisch beschickte Anlagen werden mit einem zuvor zerkleinerten Brennstoff (z.B. Hackschnitzel oder Pellets) betrieben und eignen sich daher im Besonderen für eine automatische Anpassung an eine wechselnde Wärmenachfrage. In den meisten Fällen genügen dann klein ausgelegte Wärmespeicher [1, S.468] zur Überbrückung von Phasen mit geringem Wärmeverbrauch. Diese Arbeit konzentriert sich auf diese Klasse von Feuerungssystemen.

Aktuelle Studien zeigen außerdem, dass, wenn man Kaminöfen außen vor lässt, diese Klasse von automatisch-beschickten Anlagen mittelfristig den größten Teil der neu installierten Feuerungen ausmachen wird. Gründe hierfür gibt es zahlreiche, wobei geringer Schadstoffausstoß und hoher Nutzerkomfort, wohl als gewichtigste Gründe zu nennen sind. Daher steckt im Besonderen in diesen kleinen automatisch-beschickten Anlagen technologisches und wirtschaftliches Potential. Von den über 60.000 Kleinfeuerungen die zwischen 2006 und 2007 durch das Marktanreizprogramm MAP gefördert wurden, waren zwei Drittel automatisch beschickte Anlagen und es ist davon auszugehen, dass der prozentuale Anteil weiter steigen wird. Die allgemeine Tendenz zu sinkendem Wärmebedarf wird diesen Trend zusätzlich verstärken. Abbildung 2.1 zeigt die Verteilung der neu installierten Biomassefeuerungen, welche durch das MAP erfasst wurden. Auch wenn der Fokus dieser Arbeit auf automatisch-beschickten Anlagen liegt, sind viele der in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse auch auf batchweise betriebenen Anlagen, wie beispielsweise Scheitholzkesseln, übertragbar. Die später vorgeschlagenen Regelkonzepte (CO-O₂-Regelung) sind jedoch nicht, oder nur eingeschränkt auf die stark transienten Prozesse von handbe-

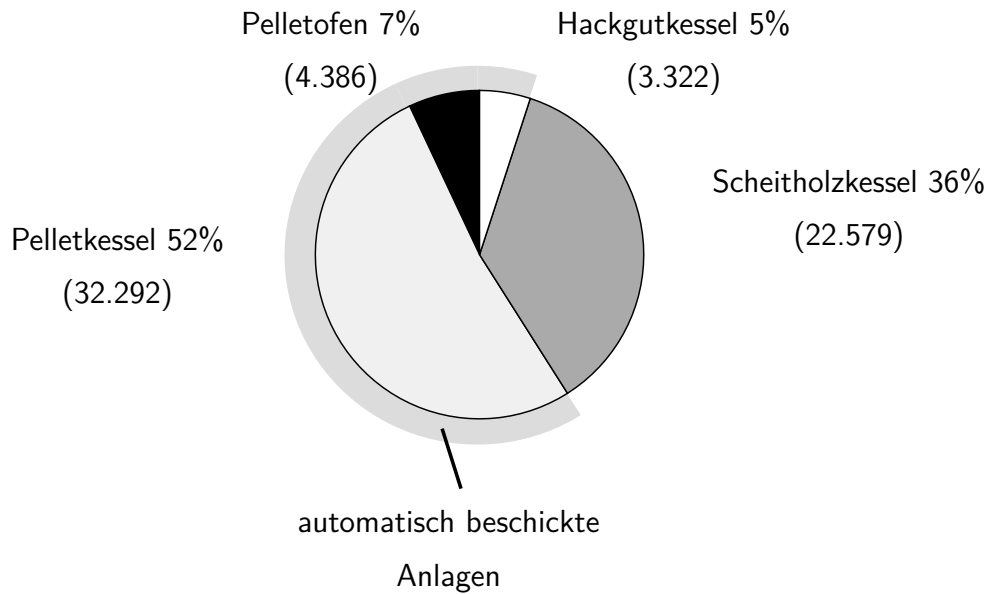


Bild 2.1: Verteilung der geförderten Anlagentypen 2006/2007 nach [20, Seite 16].

schickten Anlagen übertragbar. Diese batchbetriebenen Biomassefeuerungen setzen in den meisten Fällen auf einfache Steuerungen oder klassische sauerstoffgeführte Regelungen. Dabei sind CO-basierte Regelungen sowohl technologisch als auch wirtschaftlich schwierig zu realisieren. Regelungstechnik findet zahlreiche Anwendungen bei Biomassekleinfeuerungen. Abbildung 2.2 gibt eine Übersicht über typische Regelkreise von kleinen und mittleren Feuerungen und ordnet diese Arbeit in das Themengebiet *Regelungstechnik für Kleinfeuerungen* ein.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Thema „Verbrennungsregelung“ und hierbei im Besonderen auf sauerstoff- und kohlenmonoxidbasierten Regelsystemen. Das Themengebiet „Verbrennungstemperaturregelungen“ wird in dieser Arbeit nicht behandelt. Die Themen „Leistungsregelung“ und „Hydraulikregelung“ werden in dieser Arbeit nur am Rande angesprochen. Standardregelkreise sind hier in den meisten Fällen ausreichend. Gleiches gilt für die Unterdruckregelung, für welche bereits zahlreiche technische Lösungen existieren.

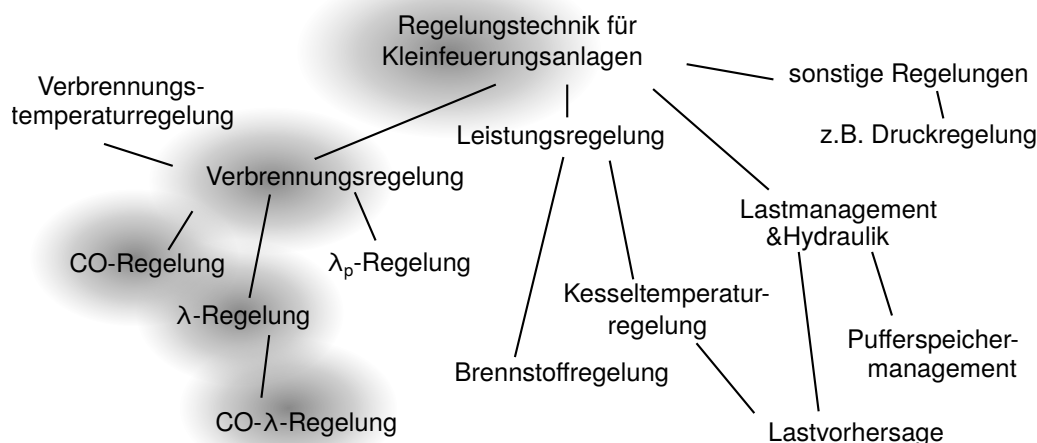


Bild 2.2: Überblick über die notwendige Regelungstechnik für Kleinfeuerungen. In grau sind die Schwerpunkte dieser Arbeit dargestellt.

2.2 Ablauf der Holzverbrennung

Zur Konstruktion und Regelung emissionsarmer und effizienter Feuerungsanlagen ist die genaue Kenntnis des Verhaltens über den Ablauf der Verbrennung von Bedeutung. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Grundprinzipien der Holzverbrennung zusammenfassend illustriert. Die Erläuterungen sind stark vereinfacht und schematisiert. Vertiefende Ausführungen sind entsprechender Standardliteratur zu entnehmen [1]. Die im Folgenden dargestellten Grundlagen der Biomasseverbrennung orientieren sich stark an den Ausführungen in „Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren“ [1].

Für die Oxidation des Brennstoffes wird dem Verbrennungsprozess eine bestimmte Menge an Sauerstoff zugeführt. Das Verhältnis aus der tatsächlich zugeführten Luftmenge und der theoretisch stöchiometrisch benötigten Luftmassenströme m wird als Luftzahl λ bezeichnet.

$$\lambda = \frac{m_{\text{tatsächlich zugeführt}}}{m_{\text{stöchiometrisch benötigt}}} \quad (2.1)$$

Für die vollständige Oxidation wäre in Theorie somit eine Luftzahl von $\lambda = 1$ notwendig. In der Praxis wird dieser Wert jedoch auf Grund unzureichender Durchmischung nie erreicht. Typische Werte für Kleinfeuerungsanlagen liegen im Bereich zwischen $\lambda = 1,3$ und $2,3$.

In der Literatur [1] wird Verbrennung von Holz typischerweise in vier Phasen unterteilt, wobei sich die einzelnen Phasen sowohl zeitlich als auch örtlich überschneiden können. Als wesentliches Unterscheidungsmerkmal dieser Phasen führen Kaltschmitt et al. den „Anteil des von außen zugeführten Sauerstoffs (d.h. die Größe der Luftüberschusszahl)“ an. Es wird unterschieden zwischen den Phasen *Aufheizung und Trocknung* ($\lambda = 0$) und

Pyrolyse und pyrolytische Zersetzung ($\lambda = 0$), *Vergasung* ($0 < \lambda < 1$) und schliessendlich der *Oxidation* des brennbaren Gases ($\lambda > 1$).

Aufheizung und Trocknung: Die Trocknung des Brennstoffes findet typischerweise bei Temperaturen unter 200 °C statt. Das im Brennstoff vorhandene Wasser formt sich endotherm zu Wasserdampf und tritt aus der porösen Struktur der Biomasse. Der Temperaturanstieg des Brennstoffes wird hierdurch, bis zum Zeitpunkt der vollständigen Trocknung, stark gebremst.

Pyrolyse und pyrolytische Zersetzung: Die pyrolytische Zersetzung der Biomasse setzt bei einer Temperatur von circa 200 °C ein. Zuerst entweichen Wasserdampf und Kohlendioxid. Bei höheren Temperaturen von 280 °C bis 500 °C folgen „Kohlenmonoxid (CO), Methan (CH₄), Formaldehyd (CH₃OH), Essig- (C₂H₄O₂) und Ameisensäure (CH₂O₂) sowie Wasserstoff (H₂)“ [1].

Vergasung: Die *Vergasung* führt den zurückgebliebenen Kohlenstoff (aus dem Pyrolysekoks) in brennbare Gase über. Typischerweise wird Luft als Vergasungsmittel verwendet, wobei Kohlenstoff (C) zu Kohlenmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO₂) oxidiert wird.

Oxidation: In der Phase der *Oxidation* werden die durch die vorhergehenden Phasen entstandenen Produkte exotherm, möglichst vollständig, zu Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O) oxidiert.

Für eine detaillierte Auseinandersetzung der Reaktionspfade in den einzelnen Phasen sei noch einmal auf [1] oder entsprechende Standardliteratur verwiesen.

2.3 Zusammenhang zwischen Emissionen und Luftzahl

Bei der Verbrennung von Biomasse treten zahlreiche gas- und partikelförmige Emissionen auf. Während Schwefeldioxid (anders als bei Ölbrennern) auf Grund der geringen Konzentration von Schwefel im Holz, eine nur sehr geringe Bedeutung hat, sind Feinstaubemissionen ein ernstzunehmendes Problem von kleinen Biomassefeuerungen. Diese Partikelemissionen setzten sich größtenteils aus den Mineralienanteilen Kalium, Magnesium und Calcium der Asche sowie Rußen und Teeren zusammen [21, 22, 23]. Als weitere wichtige Schadstoffe der Biomasseverbrennung sind die Stickoxide (NO und NO₂) zu nennen, welche entscheidend zur Bildung von bodennahem Ozon und saurem Niederschlag beitragen [24]. Auf die Bildungsmechanismen von Stickoxiden wird nicht eingegangen, da die NO_x-Reduktion kein primäres Ziel dieser Arbeit ist¹. Von zentraler Bedeutung

¹ Die Verringerung der Luftzahl, welche durch das Regelkonzept in dieser Arbeit erzielt wird, führt in den meisten Fällen zu Verbesserungen der auftretenden Stickoxide.

sind die Schadstoffe Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe, welche durch unvollständige Verbrennung auftreten. Die Reduktion dieser Schadstoffe, welche durch unvollständige Verbrennung entstehen, steht im Zentrum der vorliegenden Arbeit.

Für Verbrennungsprozesse im Allgemeinen – unabhängig davon ob Biomasse, Öl oder Gas verbrannt wird – besteht für zahlreiche Emissionen ein charakteristischer Zusammenhang zwischen der Konzentration an emittierten Schadstoffen und der Luftzahl λ . Da sich, wie bereits erwähnt, Kohlenmonoxid als *Tracer* für die meistens Schadstoffemissionen eignet (vgl. [25] und [21]), ist für die Verbrennungsqualität die sogenannte CO- λ -Charakteristik von besonderem Interesse. Auch wenn sich der Absolutwert eines Schadstoffs anhand der CO-Konzentration nicht bestimmen lässt, so korrelieren doch die Trends (also Verbesserungen und Verschlechterungen) der meisten Schadstoffe mit der Zu- und Abnahme der CO-Konzentration. Selbst die Feinstaubkonzentration weist, wie in Abbildung 2.3 ersichtlich, für bestimmte Brennstoffe und Feuerungen Korrelationen zur durchschnittlichen CO-Konzentration auf (vgl. auch [26, 27]). Wie in Abbildung 2.3 zu erkennen ist, existiert für Feinstaubemissionen eines 8 KW-Pelletkessel ein eindeutiger Zusammenhang zwischen CO und Gesamtstaubkonzentration. Die CO-Emissionen wurden gemittelt und auf 13 Vol. – % (trocken) O₂ über ein 15-minütige Messintervall normiert. Einzelne Ausreißer mit hohen CO-Konzentrationen und geringen Staubkonzentrationen auf Grund von Abschaltvorgängen sind zu erkennen. In diesen Phasen treten zwar bereits CO-Emissionen aufgrund der unzureichenden Temperatur des Ofens auf, die typischen Feinstaubbildungspfade wirken jedoch nicht. Trotz dieser offensicht-

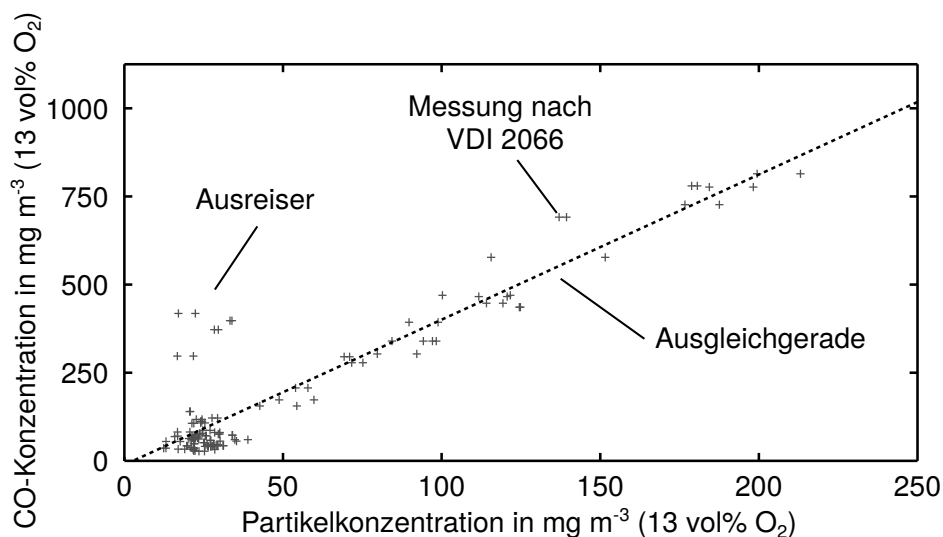


Bild 2.3: Typische CO-Gesamtstaub-Charakteristik eines Pelletofens. Staubkonzentration wurden nach VDI 2066 Blatt 1 [28] über 15 min bestimmt.

lich erkennbaren Korrelation sind natürlich zahlreiche weitere Einflussfaktoren für die absolute Staubkonzentration bei Holzfeuerungen verantwortlich. Insbesondere spielen dabei Brennstoff und Brennergeometrie eine dominierende Rolle. Verschiedene Typen von

Kleinf Feuerungsanlagen weisen durchaus verschiedene Formen von Charakteristiken auf. Abbildung 2.4 zeigt einige illustrierende Beispiele von unterschiedlichen Charakteristiken für verschiedene Biomassefeuerungs systeme.

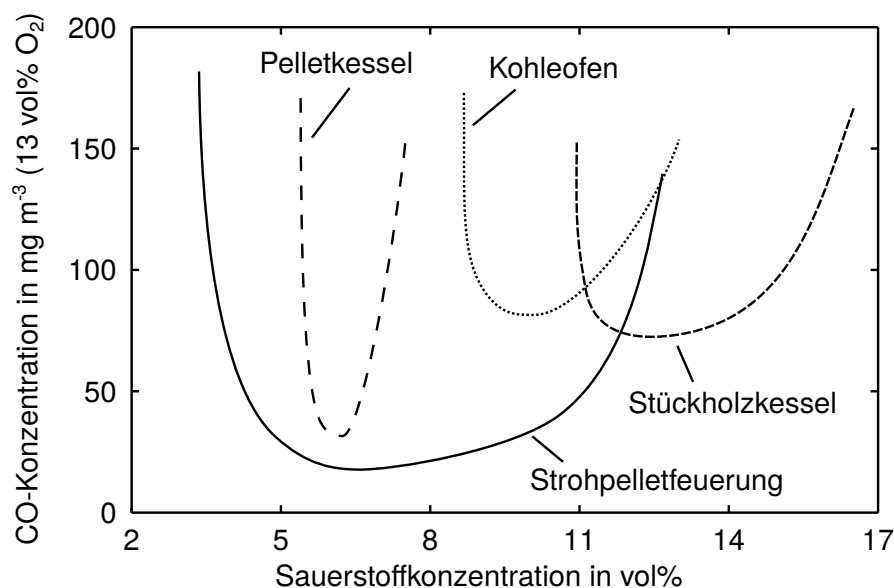


Bild 2.4: Beispielhafte CO-O₂-Charakteristik für verschiedene Anlagentypen.

Nichtsdestotrotz eignet sich die CO-Konzentration in vielen Fällen als quantitativer Maßstab für die Verbrennungsqualität, etwa bei der Festlegung gesetzlicher Grenzwerte für CO in Typenprüfungen und Schornsteinfegermessungen¹. Da die CO- λ -Charakteristik von besonderer Bedeutung für diese Arbeit ist, wird im Folgenden auf typische Merkmale und Einflussfaktoren dieser eingegangen. Abbildung 2.5 zeigt exemplarisch die CO- λ -Charakteristik eines marktüblichen Pelletofens². An diesem Beispiel sind bereits einige typische Merkmale erkennbar:

Kurvenform: Die Charakteristik weist exakt ein Minimum auf (typischerweise bei fester Biomasse zwischen 1,3 und 2,1). Für zu geringe und zu hohe λ -Werte stellen sich erhöhte CO-Emissionen ein. Der Anstieg für zu geringe Luftzahlen ist typischerweise deutlich steiler als für zu hohe Luftzahlen.

Konvexität: Erfahrungsgemäß sind für viele Kleinf Feuerungsanlagen die CO- λ -Charakteristiken konvexe Funktionen im relevanten λ -Bereich 1,0 bis 2,5. Dies lässt sich nicht auf alle Verbrennungsprozesse übertragen, ist jedoch für nahezu alle Biomasse-Kleinf Feuerungsanlagen gültig. Mathematisch ausgedrückt, muss für die

1 Wobei inzwischen sowohl für Typenprüfungen als auch Schornsteinfegermessungen inzwischen für viele Biomassefeuerungsanlagen inzwischen Staubmessungen gesetzlich verpflichtend sind.

2 Weitere Beispiele für CO- λ -Charakteristiken sind unter [29, 30, 31] zu finden.

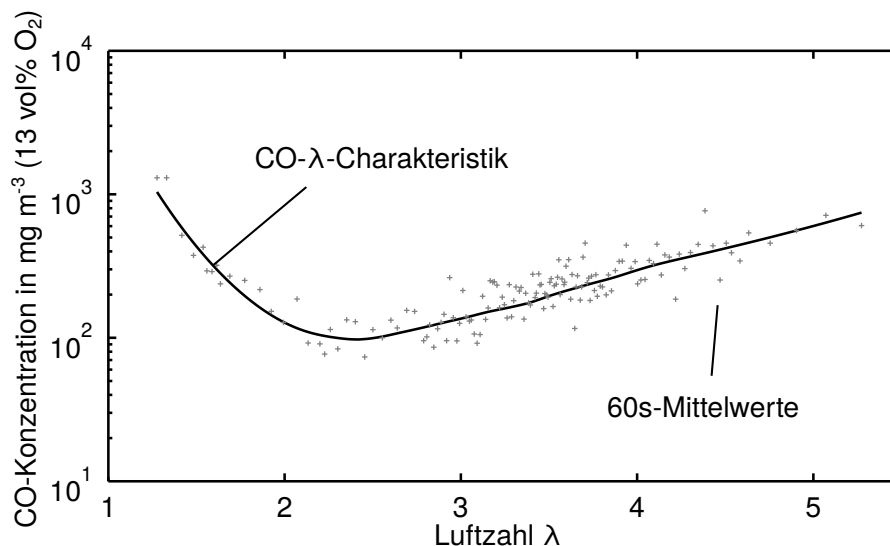


Bild 2.5: Typische CO- λ -Charakteristik in logarithmischer Darstellung am Beispiel eines marktüblichen Pelletofens.

Konvexität gelten:

$$2 \cdot c_{\text{CO}} [t\lambda_1 + (1-t)\lambda_2] \leq t \cdot c_{\text{CO}} [\lambda_1] + (1-t) \cdot c_{\text{CO}} [\lambda_2] \quad (2.2)$$

für die Kohlenmonoxidkonzentration $c_{\text{CO}} [\lambda]$ bei einer Luftzahl λ alle t zwischen 0 und 1 und beliebigen λ_1, λ_2 . Diese Eigenschaft wirkt sich positiv auf die Wahl eines Optimierungstool aus, da eine große Anzahl spezialisierter Methoden für konvexe Optimierungsprobleme in der Literatur zu finden sind [32].

Schwach ausgeprägte Minima: Für moderne (gut gedämmte) Feuerungsanlagen ist es typisch, dass zu hohe Luftzahlen nur eine sehr geringe Auswirkung auf die Schadstoffemissionen haben. Das liegt vor allem daran, dass die zusätzliche Einbringung von Verbrennungsluft nur zu einer unkritischen Reduktion der Flammtemperatur und Verweilzeit führt. Gasfeuerungen beispielsweise weisen oftmals nahezu konstantes Emissionsverhalten für einen breiten λ -Bereich auf. In Kapitel 4.4 wird diese Eigenschaft erneut aufgegriffen und erläutert, warum dies für die Optimierung von Nachteil ist und welche Lösungskonzepte sich für dieses Problem eignen.

Steigung der CO-Kante: In der Literatur wird teilweise von der so genannten „CO-Kante“ gesprochen. Diese tritt bei kleinen Biomassefeuerungen häufig nicht scharf ausgeprägt auf. Oftmals zeigt sich eher ein stetiger Anstieg anstelle einer scharfen Kante¹. Die Steilheit der CO-Kurve wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Eine bessere Durchmischung der brennbaren Gase mit der Verbrennungsluft sorgt beispielsweise

¹ vgl. Abb. 2.5 und Kapitel 2.3.

häufig zu steileren Charakteristiken. Ferner sorgen stochastische Schwankungen der Verbrennung für ein Verschwimmen der CO-Kante. Mit wachsender Anlagengröße bzw. Nennleistung tendiert die Charakteristik dazu eine steilere Kanten aufzuweisen.

Standardabweichung: Allein schon aus messtechnischen Gründen sind stochastische Abweichungen in der CO-Charakteristik zu beobachten. Aber auch Strahlenbildung, Schwankungen der Verbrennung, wie auch zeitlicher Versatz der Messgeräte führen zu einem Verschwimmen der CO- λ -Charakteristik. Sehr viel ausgeprägter werden diese Schwankungen unter Betrachtung der CO-m-Charakteristik – also der Relation zwischen den Kohlenmonoxidkonzentration und dem eingebrachten Luftmassenstrom m . Zwar sind Luftzahl und Luftmassenstrom in Theorie linear von einander abhängig, jedoch ergeben sich beim Experiment auch bei gleichbleibendem (geregeltem) Luftmassenstrom starke Schwankungen der tatsächlichen Luftzahl, da die Vergasung und Entgasung des Brennstoffes unregelmässig abläuft. In der Praxis wird daher die Luftzahl auch immer aus dem Restsauerstoff und nicht aus gemessenen Massenströmen (Luft und Brennstoff) berechnet. Wie in Kapitel 4.1 ausführlich illustriert wird, stellen diese Schwankungen eine der zentralen Herausforderungen für die kohlenmonoxidbasierten Regelungen dar. Wie aus den stark verrauschten CO- und O₂-Konzentrationen während der Verbrennung sinnvolle Informationen zur Regelung zu gewinnen sind, ist eine der wichtigsten Fragestellungen der kohlenmonoxidbasierten Regelsysteme.

Oftmals wird die CO- λ -Charakteristik bezüglich der Ordinate logarithmisch dargestellt, was dazu führt, dass das Minimum optisch stärker hervortritt. Hinzu kommt, dass der Kohlenmonoxidgehalt auf die üblichen 13 Vol. – % Sauerstoff normiert wird, mit der Folge, dass sich die Steigung optisch zu höheren λ -Werten zusätzlich erhöht. Wenn dagegen auf eine Normierung und logarithmische Darstellungen verzichtet wird, kommt es oftmals zu flach ausgeprägten Charakteristiken. Hier können bereits geringfügige stochastische Schwankungen oder Messfehler zu deutlichen Positionsveränderungen der emissionsoptimalen Sauerstoffkonzentration führen¹. Wie bereits erwähnt, wird in Kapitel 4.4 diese Problematik mit flachen Charakteristiken aufgegriffen und mehrere Lösungsvorschläge illustriert. Für die restliche Arbeit wird des Weiteren die Darstellung über die CO-O₂-Charakteristik anstelle der CO- λ -Charakteristik bevorzugt, weil die Sauerstoffkonzentration die tatsächlich gemessene Größe ist und die Umrechnung in Luftzahlen keine Vorteile verspricht.

¹ In CO-m-Charakteristiken (also der Charakteristik zwischen eingehendem Luftmassenstrom und CO-Emissionen) kann dieser Effekt noch verstärkt werden, wenn der Aktor ein ungünstiges nichtlineares Verhalten aufweist und beispielsweise bei hohen Sauerstoffkonzentrationen, große Massenstromänderungen nur geringe Änderungen der Luftzahl hervorrufen.

Von zentraler Bedeutung für die Ausbrandqualität wird in der Literatur die so genannte *3-T-rule* angeführt. Gemeint sind damit die drei Einflussgrößen *temperature*, *turbulence* und *time*. Im nächsten Abschnitt wird skizziert, wie diese drei Parameter beeinflusst werden können und welche Auswirkungen ausgewählte Faktoren auf die Schadstoffcharakteristik¹ haben.

In [16] beschreibt Good verschiedene wichtige Einflussfaktoren auf die Schadstoffcharakteristika. Er zeigte unter anderem, dass äußere Einflussfaktoren wie die Holzfeuchtigkeit, die Feuerungsleistung, aber auch Faktoren wie die Schüttdichte des Brennstoffes zu Veränderungen der CO- λ -Charakteristik führen können. Auch verschiedene andere Arbeiten, wie beispielsweise Rumpf [34] zeigen vergleichbare Ergebnisse. Da in praktischen Anwendungen diese Einflussfaktoren (wie die Brennstofffeuchte) oftmals weder direkt messbar, noch isoliert betrachtet werden können und zu alledem sich fortwährend ändern, ist grundsätzlich von einer nicht vorhersagbaren Veränderung der Schadstoff-Charakteristik auszugehen. Regelsysteme, welche nur durch die indirekte Messung der Verbrennungsqualität regeln (wie die λ -Regelung), sind daher im hohen Maße abhängig von der genauen Kenntnis dieser Veränderungen (vgl. λ -Regelung [16, Seite 85]). So kann beispielsweise eine Neukalibrierung durch den Hersteller bei einem Brennstoffwechsel oder die manuelle Eingabe der aktuellen Holzfeuchte in die Software erforderlich sein. Für Kleinf Feuerungen in der praktischen Anwendung ist dies jedoch nicht praktikabel, da die Brennstofffeuchte verschiedener Lieferungen schlichtweg unbekannt ist und auch stark innerhalb einer einzelnen Brennstoffschüttung variieren kann. Auch zahlreiche andere Einflussfaktoren sind unbekannt (z.B. Menge an Falschluff, Heizwert, Sensoroffset bedingt durch Alterung der Lambdasonde). Zu alledem existieren keine allgemein gültigen analytische Modelle, welche die optimale Sauerstoffkonzentration in Abhängigkeit dieser Einflussfaktoren bestimmen können. Auch, dass sich verallgemeinerbare Regeln und Modelle ableiten lassen, ist auf langfristige Sicht nicht zu erwarten, da die Geometrie der Feuerung und viele andere Parameter einen entscheidenden Einfluss auf diese Modelle hätten.

Im Folgenden sollen die wichtigsten bekannten Einflussgrößen auf die CO- λ -Charakteristik qualitativ und stark vereinfacht dargestellt werden. Es handelt sich hierbei um stark verallgemeinerte Aussagen und Erfahrungen, deren Gültigkeit von Anlage zu Anlage variieren kann.

Einfluss der Holzfeuchtigkeit: Ein typisches Beispiel für eine Veränderung der Brennstoffcharakteristik tritt bei sich ändernder Brennstofffeuchte in kleinen Hackschnitzel Feuerungen auf, wenn sich der Feuchtegehalt des Holzes auf Grund der Jahreszeit oder der gelieferten Brennstoffqualität verändert. Skok und Rimar [35] beschreiben

¹ Mit Schadstoffcharakteristik ist im Folgenden ausschließlich die Charakteristik zwischen CO, VOC und eingeschränkt PM₁₀ und Luftzahl λ bzw. der Restsauerstoffkonzentration gemeint. Stickoxidbildung unterliegt anderen Bildungsmechanismen [1, 33] und wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

die Auswirkungen von feuchten Hackschnitzeln auf die optimale Luftzahl und empfehlen bereits eine schadstoffbasierte Regelung als möglichen Lösungsansatz. Im Allgemeinen sorgt eine höhere Holzfeuchtigkeit zu einer Verschiebung zu allgemein höheren CO-Emissionen und verschiebt gleichzeitig das Minimum in Richtung geringerer λ -Werte. Eine Erhöhung der λ -Werte führt zu einer stärkeren Erhöhung der CO-Emissionen, als es bei niedrigeren Brennstofffeuchten der Fall wäre, da die adiabate Verbrennungstemperatur bereits durch zusätzliches, durch den Brennstoff eingebrachtes Wasser, tiefer liegt. Diese zusätzliche Abkühlung – hervorgerufen durch die aufzubringende Verdampfungsenthalpie – bewirkt, dass die CO-Emissionen empfindlicher auf zu hohe Sauerstoffkonzentrationen reagieren. (vergleiche [34, Seite 68]). Es existieren verschiedene Modelle für den Abbau der CO-Emissionen [1, Seite 412] unter Einfluss von Wasserdampf. Das Modell für den Temperaturbereich 730 °C bis 980 °C ist gegeben durch:

$$\frac{dCO}{dt} = -1.3 \cdot 10^{14} \exp\left(\frac{-126000}{RT}\right) \cdot CO \cdot (H_2O)^{0.5} (O_2)^{0.5} \quad (2.3)$$

Zu erkennen ist, dass eine Erhöhung des Wassergehaltes bei gleichbleibender Temperatur und Sauerstoffgehalt sich positiv auf die Abbaurate des Kohlenmonoxids auswirkt. Da die Änderung der Brennstofffeuchte ebenfalls die adiabate Verbrennungstemperatur senkt (und diese exponentiell wirkt), kommt es in der Summe zu einer Senkung der Abbaugeschwindigkeit $\frac{dCO}{dt}$. Ebenfalls zu erwähnen ist, dass feuchte Brennstoffe ein höheres Primärluftverhältnis¹ λ_p benötigen und sich damit die Turbulenz in der Sekundärkammer im Allgemeinen verschlechtert. Die Aussage, dass sich die optimale Luftzahl bei feuchten Brennstoffen tendenziell zu niedrigeren Werten verschiebt, bezieht sich daher auf gleichzeitiges Festhalten der Primärluftmenge (vgl. [36]).

Einfluss der Feuerungsleistung: Die Feuerungsleistung beeinflusst vor allem Turbulenz (auf Grund der proportional höheren Fließgeschwindigkeiten) und Temperatur (höhere Umsatzdichte pro Volumeneinheit). Typisch für geringere Leistungen ist eine generelle Anhebung der CO-Emissionen sowie eine Verschiebung der Charakteristik zu höheren Lambdawerten. Dieser Effekt ist vor allem bedingt durch die geringere Durchmischung im – auf Nennleistung ausgelegten – Brennraum. Außerdem steigt die Wahrscheinlichkeit, dass unvollständige Durchmischung und lokale Strahlenbildung auftreten. Kleinfeuerungsanlagen werden häufig bei geringer Last mit höheren Primärluftzahlen betrieben, was dafür sorgt, dass die Sekundärluftmenge mit sinken-

¹ Im Folgenden ist das Primärluftverhältnis definiert als der Quotient aus dem primärseitig zugegebenen Luftmassenstroms und dem stöchiometrisch benötigten Luftmassenstrom.

der Leistung sogar überproportional sinkt. Positiv können sich jedoch die längere Verweilzeit durch geringere Volumenströme auswirken (vergleiche [37, 38]).

Einfluss der Schüttdichte: Eine Verringerung der Schüttdichte ist nach Good [16] vergleichbar einer Abnahme der Leistung und hat daher ähnliche Effekte auf die Charakteristik. Stark verallgemeinert lässt sich sagen, dass höhere Leistungen zu tieferen optimalen Luftzahlen führen.

Einfluss der Temperatur: Eine Erhöhung der Temperatur, beispielsweise durch Verbesserung der Wärmedämmung, wirkt sich positiv auf die Charakteristik aus. Vor allem für hohe λ -Werte und kleine Feuerungen – wenn die Temperatur die kritische Komponente ist – bewirkt eine Erhöhung der Temperatur eine Absenkung der gesamten Charakteristik. Für schlecht gedämmte Systeme wie beispielsweise Kaminöfen mit großen Glasflächen, besteht hier ein großes Potenzial zur Emissionsreduktion.

Einfluss der Turbulenz: Durch stärkere Turbulenz (zum Beispiel durch Drallkörper oder kleineren Düsen) wird die Charakteristik typischerweise schärfer. Besonders für tiefe λ -Werte wird die Kurve steiler und dieser Effekt führt zu einer ausgeprägteren CO-Kante. Auch ein generelles Absinken der Emissionen, lässt sich häufig bei kleinen, wie auch mittleren Anlagen beobachten.

Einfluss der Größe des Glutbett: Eine Vergrößerung der Glutbettfläche verursacht oftmals eine gleichmäßigere Wärmeverteilung und Vergasung und kann damit zu geringeren Sauerstoffschwankungen führen. Hierdurch wird häufig die Streuung der CO-Messwerte reduziert, was zu einer weniger stark verrauschten Charakteristik führen kann. Diese Aussage ist jedoch nicht für alle Anlagentypen verallgemeinerbar. Für spezielle Rostgeometrien können Vergrößerungen des Glutbetts auch die Instabilität der Vergasung verstärken.

Einfluss der Primärluft: Verringert sich die Menge an Primärluft, hat dies mehrere Auswirkungen. Zum einen wird bei gleicher Luftzahl λ die Menge an Sekundärluft erhöht wodurch die Turbulenz in der Sekundärzone typischerweise ansteigt. Zum anderen verringert sich die Glutbettmasse durch eine geringere Menge an Primärluft. Welcher der Effekte schließlich überwiegt und ob eine Veränderung der Primärluft zu Verschlechterungen oder Verbesserungen der CO-Emissionen führt, lässt sich nicht im Allgemeinen beantworten und hängt stark von Brennstoff und vor allem der Feuerungsgeometrie ab¹. Abbildung 2.6 zeigt für eine 30 kW Hackschnitzelfeuerung, die sich ergebenden CO- λ -Charakteristiken für Primärluftzahlen zwischen 0,4 und

¹ Vergleiche auch [38, 39, 40, 41, 36]

0,7. Aufgetragen sind die mittleren¹ CO-Konzentrationen über der Luftzahl. Deutlich zu Erkennen ist, dass geringere Primärluftzahlen die CO-Kante zu kleineren Luftzahlen verschiebt. Dies ist damit zu erklären, dass bei gleicher Luftzahl eine höhere Turbulenz (und damit bessere Durchmischung) in der Brennkammer erreicht wird. Gleichzeitig verschiebt sich auch der rechte Ast der CO- λ -Charakteristik. Dies wäre damit zu erklären, dass sich die Verweilzeit der Verbrennungsgase in der Sekundärkammer sich durch kleine Primärluftzahlen reduziert und somit hohe Luftzahlen einen stärkeren Anstieg der CO-Emissionen hervorrufen.

Zahlreiche weitere Faktoren, wie beispielsweise Brennwert, Brennstoffzusammensetzung sowie die Luftführung beeinflussen direkt oder indirekt die Schadstoffcharakteristik einer Feuerung. Die meisten dieser Parameter sind während des typischen Betriebs von Biomassekleinfeuerungsanlagen unbekannt und können zeitlich stark variieren. Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass eine hohe Anzahl an Parametern die Charakteristik beeinflusst und diese in ihrer Vielzahl zum Zeitpunkt des Anlagenbetriebs weitestgehend unbekannt sind.

¹ Die Mittelung der CO-Emissionen erfolgt jeweils für ein Luftzahlintervall der Breite 0,2 bzw 20 % und wurde anschliessend mit der Standardabweichung in die Mitte des Intervalles eingezeichnet.

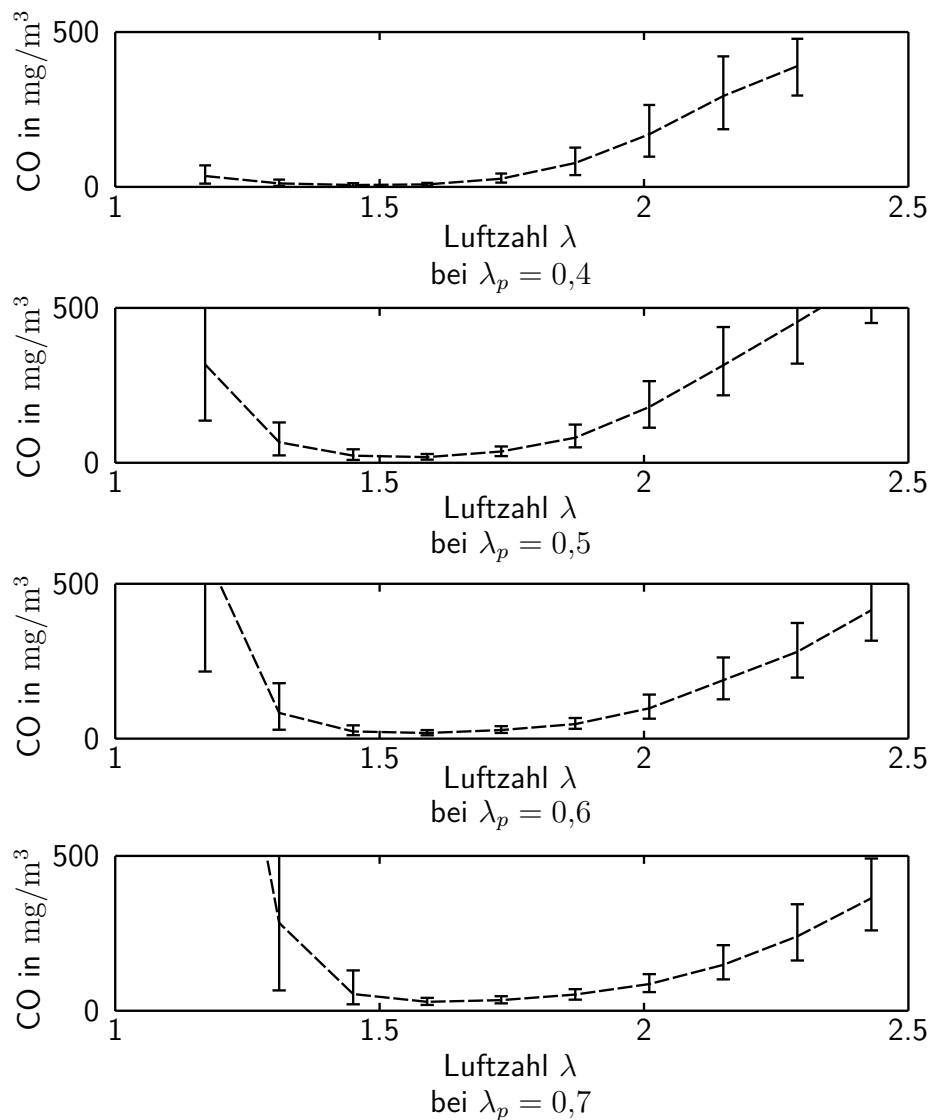


Bild 2.6: Charakteristiken für verschiedene primäre Luftzahlen. Messungen aus [34] entnommen.

2.4 Stand der Technik und Forschung

Dieses Kapitel gibt einen ersten Überblick über Stand der Technik und Forschung, erhebt aber gleichzeitig keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Unterschieden wird in den momentanen Stand der Technik (2.4.1), den Stand der Forschung von sauerstoffgeführten Regelungen (2.4.2) und schließlich den Stand der Forschung von kohlenmonoxidgeführten Regelungen (2.4.3).

2.4.1 Stand der Technik der Regelung von Biomassefeuerungen

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in den aktuellen Stand der Technik und fasst Forschungsergebnisse bisheriger Regelungsansätze und Anwendungen für Biomassefeuerungen zusammen. Im Folgenden wird im Besonderen zwischen sauerstoff- und kohlenmonoxidbasierten Regelsystemen unterschieden und Vor- und Nachteile dieser Konzepte werden aufgezeigt. Sauerstoffbasierte Regelungen sind die klassischen Regelungen für Verbrennungsprozesse unterschiedlichster Art. Diese werden bereits seit Jahrzehnten im Automobilbau zur Regelung von Verbrennungsmotoren verwendet und werden standardmäßig in zahlreichen Verbrennungsprozessen eingesetzt. Die Prinzipien sind meistens sehr einfach: Durch Experimente und Voruntersuchungen wird zuerst empirisch bestimmt, welche Sauerstoffkonzentration sich positiv auf die Verbrennung auswirkt und gleichzeitig Abgaswärmeverluste und Emissionen in einem guten Kompromiss zueinander stehen. Zusätzlich können weitere Nebenbedingungen erfüllt werden (z.B. Unterdruck in der Brennkammer oder bei größeren Anlagen die maximale Brennkammertemperatur). Für temperaturkritische Feuerungen (man denke an Korrosion und Verschlackung) wird teilweise über höhere Luftzahlen auf eine gewünschte Brennkammertemperatur gekühlt. Ein oder mehrere Aktoren (Gebläse oder Luftklappen) regeln die gewünschten Luftmassenströme, welche der Verbrennung den notwendigen Sauerstoff zuführen. Bereits durch sehr einfache Regelungstechnik kann bei dieser Art der Regelung eine deutliche Verbesserung des Verbrennungsprozesses erreicht werden.

Die Regelungstechnik an sich ist weitestgehend unabhängig davon, ob nun Kohle, Biomasse oder Erdgas verbrannt wird und ob es sich um ein Großkraftwerk oder einen Ottomotor handelt. Diese sauerstoff- oder luftzahlgeführten Regelstrategien, welche meist als PID-Regler ausgeführt werden, bringen drei wichtige Vorteile mit sich: strukturelle *Einfachheit*, hohe *Robustheit* und ausgereifte, kostengünstige *Messtechnik*.

Einfachheit: Sowohl die Implementierung, als auch Optimierung dieser Regelkreise kann von Ingenieuren oder Technikern ohne fortgeschrittenes regelungstechnisches Wissen durchgeführt werden. Die Theorie dieser linearen Regler (meist PI oder PID) ist einfach zu verstehen und PID-Regler finden sich heutzutage in großer Zahl in nahezu jeder technischen Anwendung. Zudem sind eine Vielzahl an Erweiterungen zur Verbesserung der Regelgüte und Robustheit bekannt und zahlreiche Einstellverfahren und Optimierungsstrategien der Regelparameter sind standardisiert. Sowohl analoge als auch digitale Lösungen lassen sich preiswert und ohne großen Zeit- und Entwicklungsaufwand realisieren. Die Funktionsweise des PID-Regler ist (unter Ingenieuren) allgemein bekannt und die Algorithmen zum Einstellen der Regler (z.B. [42]) bedienen sich meistens einer intuitiven und zudem gut dokumentierten Vorgehensweise. Ein PID-Regler lässt sich typischerweise für die meisten Anwendungen innerhalb weniger Stunden einstellen. Für einfache Anwendungen (z.B. Leistungs- oder Druck-

regelung) mit geringen Ansprüchen an die Regelgüte können auch einfache PI- oder sogar reine P-Regler eingesetzt werden, die sich bereits durch „try & error“ einstellen lassen. Für anspruchsvollere Regelungsprobleme kommen auch fortgeschrittenere Regler, wie beispielsweise modellbasierte Regler (MBR), zum Einsatz. Diese basieren zwar zum größten Teil ebenfalls auf PID-Regler jedoch kann die Regelgüte gesteigert werden (vergleiche [43]).

Robustheit: Einfache PID-Regler haben im Allgemeinen eine hohe Robustheit gegen Störungen und Modellierungsungenauigkeiten. Zahlreiche Erweiterungen wie beispielsweise *anti-wind-up* und *Störgrößenkompensation* erlauben zusätzlich eine Verbesserung der Regelgüte und Robustheit. Instabilität kann bei den meisten technischen Systeme verhindert werden und der integrale Anteil sorgt dafür, dass sich keine bleibende Regelabweichung einstellt. Als wichtiger Vorteil ist außerdem zu nennen, dass im Gegensatz zu anderen Regelkonzepten, kein Modell des zu regelnden Systems vorliegen muss und somit der zeitaufwendige Schritt der Modellierung und Systemidentifikation entfällt.

Messtechnik: Ein wichtiger Vorteil der sauerstoffgeführten Regelsysteme ist außerdem, dass die Lambdasonde bzw. Breitbandlambdasonde seit Jahrzehnten in hohen Stückzahlen produziert wird und dadurch heute technisch ausgereift und kostengünstig verfügbar ist. Die Eignung für Biomassefeuerungen ist nachgewiesen und zahlreiche Hersteller bieten Lambdasonden für besondere Ansprüche (z.B. Hitzebeständigkeit, Langzeitstabilität und viele weitere) an.

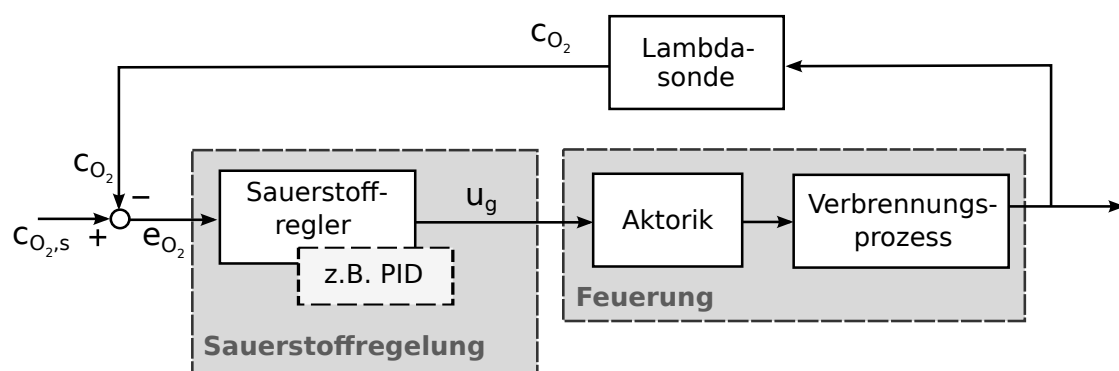


Bild 2.7: Typische Reglerstruktur zur Sauerstoffregelung von Kleinf Feuerungen. Als Aktor wird meist ein Gebläse (Saugzuggebläse oder Sekundärluftgebläse) eingesetzt und das Stellsignal u (z.B. Stellsignal 0 V bis 10 V für den Frequenzumrichter oder Phasenanschnittsteuereinheit) wirkt auf die Feuerungsanlage, welches wiederum die Sauerstoffkonzentration beeinflusst. Diese wird von der Lambdasonde gemessen (c_{O_2}) und mit dem aktuell gewünschten Sauerstoffsollwert $c_{O_2,s}$ verglichen. Der daraus resultierende Regelfehler e_{O_2} beeinflusst über das gewählte Regelgesetz die Stellgröße u .

Abbildung 2.7 zeigt die zugrunde liegende Struktur dieser Regelkonzepte. Hinter der Brennkammer und dem Wärmeübertrager wird die Luftzahl λ bzw. die Sauerstoffkonzentration c_{O_2} mittels einer Lambdasonde gemessen. Auf eine Unterscheidung zwischen Luftzahl und Sauerstoffkonzentration soll im Folgenden verzichtet werden. Als Regelgröße wird von nun an, aus Gründen der Vereinheitlichung, die Sauerstoffkonzentration c_{O_2} bevorzugt¹. Der gemessene Wert c_{O_2} wird mit dem empirisch bestimmten Sollwert der Sauerstoffkonzentration $c_{O_2,s}$ verglichen und die berechnete Abweichung e_{O_2} der Regelung zugeführt. Diese Regelung – ob nun ein PID-Regler oder eine modellbasierte Regelung (MBR) ist zu vernachlässigen – passt die Einstellung des vorhandenen Aktors an. In wissenschaftlichen Anwendungen ist es außerdem von Vorteil einen Massenflusssensor (eng.: *mass flow sensor*) einzusetzen. In diesem Fall wird nicht direkt die Stellgröße des Aktor vorgegeben, sondern der Massenflusssollwert für einen unterlagerten Massenflussregelkreis (eng.: *mass flow controller (MFC)*). Abbildung 2.8 zeigt den Aufbau eines solchen Reglers mit unterlagertem Massenflussregelkreis. Für diese unterlagerten Regelkreise werden nahezu ausschließlich die bereits erwähnten PI- bzw. PID-Regler eingesetzt. Diese Regelkreise weisen durch die zusätzliche Information des aktuellen Massenstromes eine höhere Robustheit und ein besseres Regelverhalten auf. In der Praxis wird auf die Massenflusssensoren aus Kostengründen fast immer verzichtet. Bei größeren Anlagen kommen Systeme zum Einsatz, die über den Druckabfall innerhalb eines Rohrabchnittes oder an einer Blende, den Volumenstrom bestimmen [45, 46, 47].

Aus wirtschaftlichen Gründen sind auch andere Regel- und Steuerkonzepte entstanden, die von vornherein versuchen auf die anfällige und teure Gasmesstechnik zu verzichten. So finden sich beispielsweise, außer den sauerstoffgeführten Regelsystemen auch Kessel und Öfen, deren Luftmenge direkt über die Flammtemperatur geregelt wird, auf dem Markt. Insbesondere im niedrigpreisigen Segment sind die günstig verfügbaren und robusten Thermosensoren ein entscheidendes Argument für diese Art der Regelung. Die Idee dieser Regelstrategie basiert grundsätzlich auf der Korrelation zwischen Sauerstoffgehalt und Flammtemperatur. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen sind jedoch auch einige Nachteile zu nennen. Die Temperaturregelung funktioniert nur unter stationären Bedingungen und daher sind auch Anfahr- und Stop-Vorgänge schwer regelbar. Außerdem lässt sich die Flammtemperatur oftmals nur schwer bestimmen, da es zu deutlichen Überlagerungen von Wärmekonvektion, -strahlung und -leitung kommt [48] und damit die Korrelation zur Sauerstoffkonzentration nicht allgemeingültig ist. Auch die Empfindlichkeit dieser Regelung für Leistungsschwankungen liegt auf der Hand. Eine starke Korrelation zwischen

1 Die Luftzahl λ kann alternativ zur Sauerstoffkonzentration c_{O_2} als Regelgröße verwendet werden. Man beachte, dass die nichtlineare Beziehung zwischen c_{O_2} und λ regelungstechnisch durchaus einen Einfluss auf die Regelgüte haben kann. So wird beispielsweise in [44] empfohlen, die Luftzahl als Regelgröße zu bevorzugen. Grund hierfür ist der lineare Zusammenhang zwischen Gesamtluftmassenstrom und Luftzahl und die damit verbundene Vereinfachung der Regelung.

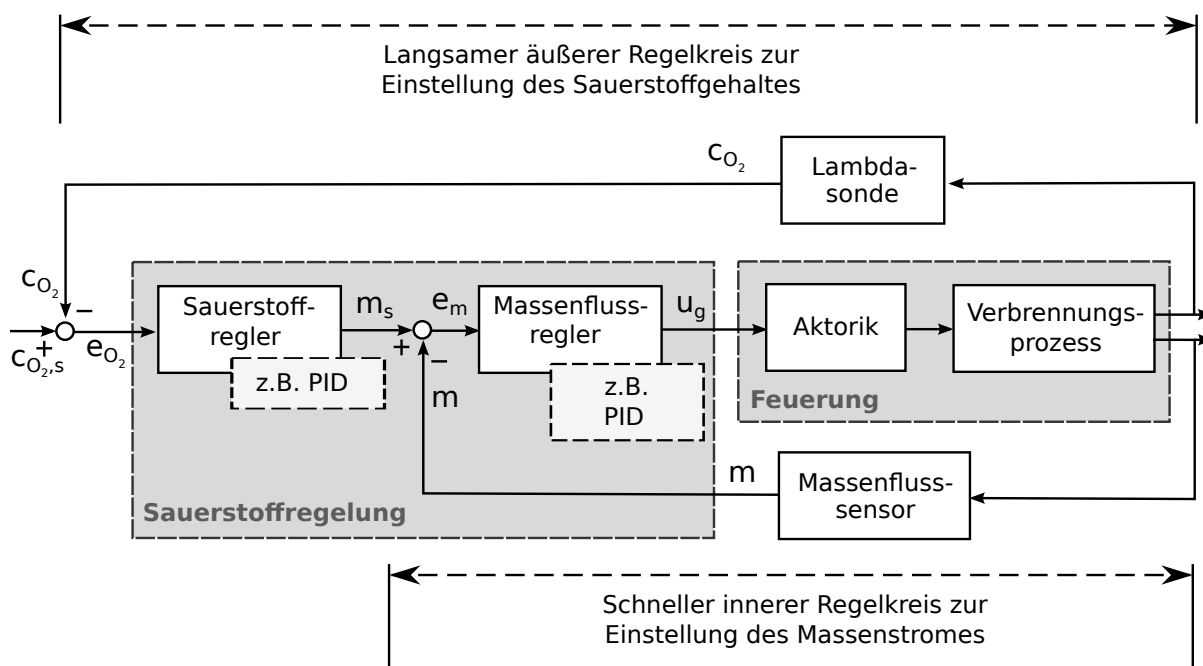


Bild 2.8: Sauerstoffregelung mit unterlagertem Massenstromregler zur besseren Störgrößenunterdrückung. Die Regelung ist in zwei kaskadierte Regelkreise unterteilt. Ein äußerer, langsam eingestellter Regelkreis regelt die Sauerstoffkonzentration und gibt als Stellwert den Sollwert für den unterlagerten Massenflussregler vor. Dieser wird mit dem gemessenen Massenstrom verglichen und der PID-Regler gibt die Stellgröße u für die Aktorik vor.

Primärluftmenge und Temperatur im Brennraum ermöglicht auch Leistungsregelungen durch Messung der Temperatur.

Kaminöfen werden üblicherweise unregelt betrieben. Auch reine Unterdruckregelungen für kleine Pelletkessel sind zu finden, falls der Unterdruck in der Brennkammer und der angesaugte Luftmassenstrom miteinander korrelieren. Auf eine detaillierte Beschreibung dieser Systeme ohne Gasmesstechnik wird in dieser Arbeit verzichtet, da sie sich in der Ausführung sehr unterscheiden und verschiedenste Lösungen auf dem Markt erhältlich sind. Die strengeren Grenzwerte der BImSchV könnten diese Pelletkessel ohne Verbrennungsregelung für bestimmte Leistungsklassen ohnehin langfristig vom Markt verschwinden lassen.

2.4.2 Stand der Forschung von sauerstoffbasierten Regelungen

Neben den PID-Sauerstoff-Reglern werden in der Literatur auch fortgeschrittene Regelalgorithmen wie modellbasierte Regelung (MBR bzw. eng.: *model based control MBC*) [43], modellprädiktive Regelung [44, 49] (MPC), oder auch Fuzzyregelung – wenn auch meist als universitäre und prototypische Umsetzung – zur Regelung von Feuerungen eingesetzt (vgl. auch [50, 51, 52, 53, 54, 55]). Das in Abbildung 2.7 und 2.8 illustrierte

Grundprinzip bleibt jedoch für alle sauerstoffgeführten Regelkreise erhalten. In den letzten Jahren wurde im Besonderen an modellbasierten Regelungen für Biomassefeuerungen geforscht. Diese basieren auf einem hinterlegten Modell des Verbrennungsprozesses (unter anderem Verbrennungsrechnung, Energieerhaltung, Dynamiken der Luftmassenströme und der Wärmeübergänge im Kessel). Durch diese zusätzliche Informationen verbessern sich im Besonderen die langsamen Prozesse, wie beispielsweise die Leistungsregelung, aber auch die Regelgüte schnellerer Prozesse, wie die Sauerstoffregelkreise können verbessert werden.

In dieser Arbeit kommen sowohl klassische PID-Regler zur Sauerstoff- und Leistungsregelung, als auch von Bionenergy2020+ entwickelte modellbasierte Regelungen zur Anwendung. Auf detaillierte Ausführungen zur modellbasierten Regelung wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Entsprechende Literatur ist von Gölles et al. [43] zu finden.

2.4.3 Stand der Forschung von kohlenmonoxidbasierten Regelungen

Neben diesen weitverbreiteten, sauerstoffgeführten Regelsystemen sind vereinzelt auch Systeme auf Basis von Kohlenmonoxid im Abgas zu finden. Es ist zu betonen, dass diese nahezu ausschließlich universitären und prototypischen Charakter aufweisen und derzeit keine Anlagen mit dieser Klasse von Regelungen am Markt erhältlich sind. Bei Großfeuerungsanlagen kamen bereits erste einfache und meist intuitiv getriebene kohlenmonoxidbasierte Regelalgorithmen zum Einsatz (vgl. [2, S.43 ff]). Der folgende Abschnitt zeigt ein exemplarisches Vorgehen für eine Großfeuerungsanlagen, um das Minimum des Kohlenmonoxidgehalts $c_{CO,min}$ während des Verbrennungsprozesses zu finden. Die Optimierung lässt sich in vier Schritte unterteilen:

Variation der Luftzahl: Die zum Zeitpunkt t eingestellte Luftzahl wird während des Verbrennungsprozesses um $\Delta\lambda$ verkleinert bzw. vergrößert.

Vergleich der sich daraufhin einstellenden Emissionen: Die auf Grund der Veränderung der Luftzahl entstandenen Änderungen in den CO-Konzentrationen werden qualitativ bewertet.

Anpassung der Luftzahl: Haben sich die eingestellten Emissionen durch die Luftzahlveränderung verschlechtert, wird die Änderung zurückgenommen und die Änderung in die entgegengesetzte Richtung fortgeführt. Sind die Emissionswerte dagegen gesunken, wird die Variation der Luftzahl in dieselbe Richtung fortgesetzt.

Wiederholung der vorhergehenden Schritte: Die zuvor beschriebenen Schritte *Variation*, *Vergleich* und *Anpassung* werden während des Prozesses fortlaufend wiederholt und die Luftzahl bewegt sich hierdurch im Laufe der Zeit in Richtung des gewünschten Minimums der Kohlenmonoxidkonzentration.

Abbildung 2.9 verdeutlicht das prinzipielle Vorgehen zum besseren Verständnis.

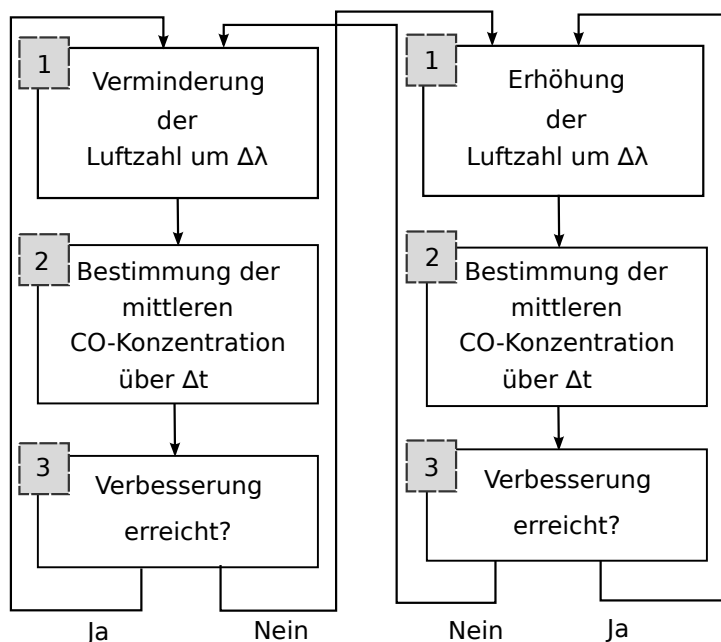


Bild 2.9: Typisches Ablaufschema bisheriger CO-Regler.

Die Schrittweite $\Delta\lambda$ ist in diesem Verfahren sowohl konstant als auch variabel vorstellbar¹. Das beschriebene Vorgehen hat sich jedoch ausschließlich bei stationären Prozessen mit einer geringen natürlichen Fluktuation² der Luftzahl und einer relativ schnellen Dynamik des Gesamtsystems geeignet. Der beschriebene Algorithmus schätzt im Prinzip den Gradienten zwischen zwei stationären Arbeitspunkten und fährt – in Abhängigkeit des Vorzeichens – in Richtung des Optimums. Der wichtigste Nachteil dieses Vorgehens ist die Tatsache, dass tatsächlich stationäre Arbeitspunkte zur Bewertung der CO-Emissionen erreicht werden müssen. Sind – wie bei Kleinf Feuerungsanlagen meist – starke Luftzahlfluktuation durch einen unregelmäßigen Vergasungsprozess vorhanden, kann dies zu einem ständigen Vor- und Zurückschreiten des Stellgliedes führen. Ungünstige Frequenzen dieser Schwankungen können zu einer sehr langsamen Konvergenz oder schlimmstenfalls, zu einem Abdriften vom gewünschten Minimum führen. Lange Totzeiten und langsame Dynamiken sorgen außerdem dafür, dass sehr lange Zeitintervalle zwischen den einzelnen Optimierungsschritten notwendig werden, um das System ausreichend lang einschwingen zu lassen.

Für Kleinf Feuerungsanlagen fester Brennstoffe sind diese kohlenmonoxidbasierten Methoden auf Grund der eben beschriebenen Probleme nur mit geringem Erfolg eingesetzt

1 Eine Anpassung der Schrittweite ist beispielsweise – ähnlich zum Newton Verfahren – in Abhängigkeit des Gradienten denkbar.

2 mit *natürlicher Fluktuation* ist an dieser Stelle, die stochastische Veränderung der Luftzahl gemeint, welche nicht durch die Regelung hervorgerufen wird sondern eine Folge von Unregelmäßigkeiten im Verbrennungsprozess ist.

worden. So sind beispielsweise Ansätze am IFK verfolgt worden [56, 57], welche über statistische Auswertung der CO-Emissionen auf die Existenz und Lage der CO-Kante schließen. Dies stellt eine Erweiterung des von Völkel [58] vorgeschlagenen Algorithmus zu Regelung kleiner Ölkessel dar. Auch Vogl [59] versuchte das Anfahren der CO-Kante auf kleine Biomassekessel zu übertragen, jedoch unter sehr langen Optimierungsintervallen und unzuverlässiger Detektion des Minimums. Die Arbeiten von Kohler [9] illustrieren eine Anwendung von CO-Sensorik, allerdings mit Fokus auf die instationären Verbrennungsprozesse von handbeschickten Anlagen. Die praxistaugliche Validierung der Konzepte ist bisher in keiner der Arbeiten demonstriert worden. Bei den erwähnten Konzepten lässt sich außerdem nur eingeschränkt von „Regelung“ im herkömmlichen Sinne sprechen, da die Struktur teils eher einem Ablauf von Steuerungen und Parametrierungen ähnelt. Abbildung 2.10 zeigt den typischen Aufbau von reinem Kohlenmonoxid-basierten Regelsystemen.

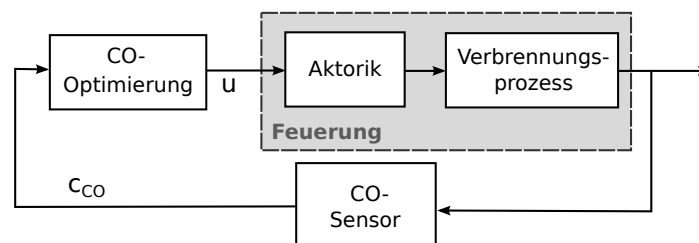


Bild 2.10: CO-Regler-Struktur bei Kleinf Feuerungen ohne Messung der Sauerstoffkonzentration. Als Aktor werden ein oder mehrere Gebläse eingesetzt. Der Aktor wird über das Stellsignal u gesteuert und stellt einen Luftmassenfluss ein. Die gemessene Kohlenmonoxidkonzentration c_{CO} wird in einem Optimierungsalgorithmus zur Optimierung der Stellgröße verwendet. Ähnlich, wie bei den sauerstoffgeführten Reglern ist die Struktur mit und ohne *mass flow controller* (MFC) realisierbar.

Vielversprechender als die reinen CO-Regelkonzepte, sind die Ergebnisse von Padinger [2], welche auf einem Regler mit Sauerstoff- und Kohlenmonoxidmessung basieren. Abbildung 2.11 zeigt den typischen Aufbau dieser dritten Klasse von Regelkonzepten, die auf der Kombination aus CO- und O_2 -Messung basieren. Diese Konzepte vereinen die Vorteile der beiden Konzepte CO-Regelung und O_2 -Regelung. Abbildung 2.11 stellt die typische Struktur dieser Regler dar.

Good [16] stellte in seiner Dissertation ein rein CO-, als auch CO- O_2 -basiertes Regelkonzept vor. In seiner Arbeit illustrierte er bereits die Vorteile der gleichzeitigen Messung von Sauerstoff und Kohlenmonoxid. Er verfolgte die Idee, die Sauerstoffkonzentration in verschiedene Intervalle einzuteilen und in jedem dieser Sauerstoffintervalle mittlere die Kohlenmonoxidkonzentration zu bestimmen. Hierdurch entsteht für die unterschiedlichen Sauerstoffintervalle eine repräsentative (mittlere) Kohlenmonoxidkonzentration. Im

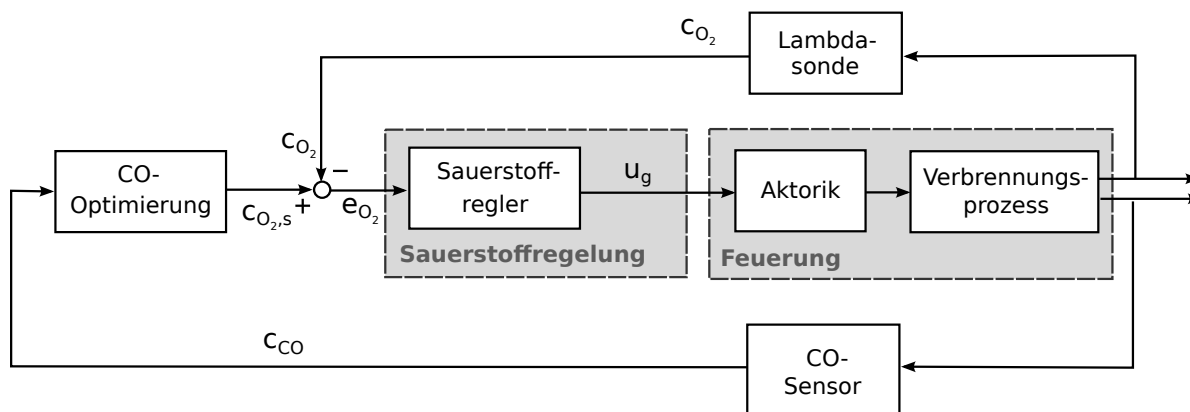


Bild 2.11: Typischer Aufbau von Regelsystemen mit Sauerstoff- und Kohlenmonoxidmessung. Der Sollwert $c_{O_2,s}$ der Lambda-Regelung wird durch einen Optimierungsalgorithmus mittels der gemessenen Kohlenmonoxidkonzentration c_{CO} zum emissionsoptimalen Sauerstoffsollwert gefahren. Der Sauerstoffregelkreis mit Sauerstoffkonzentration c_{O_2} , Regelfehler e_{O_2} und Stellgröße u_g bleiben erhalten.

nächsten Schritt werden die unterschiedlichen Sauerstoffintervalle miteinander bezüglich ihrer mittleren CO-Konzentration verglichen. Die O_2 -Konzentration mit der geringsten CO-Konzentration wird ausgewählt und die Anlage in dieses Sauerstoffintervall gefahren. Hierbei liegen einige Nachteile auf der Hand. Erstens ist die Wahl der Anzahl der Sauerstoffunterteilungen nicht trivial. Werden zu viele Intervalle gewählt, verschlechtern einzelne stochastische Ausreißer die Mittelwerte deutlich, da schließlich in jedem einzelnen Intervall deutlich weniger Messungen zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegen.

In Tabelle 2.1 werden die wichtigsten Arbeiten, im Bereich der kohlenmonoxidbasierten Regelung zusammengefasst und auf die entsprechenden Quellen verwiesen. Summa summarum lässt sich über bisherige Ansätze für kohlenmonoxidbasierte Regelungen sagen: Die bisherigen Ansätze sind nicht, oder nur unter großem Aufwand und geringen Nutzen für Biomassefeuerungen einsetzbar. Die vorgestellten Regelungen sind nicht unter praxisüblichen Bedingungen validiert und basieren ausschließlich auf empirischen Konzepten, welche die Anforderungen an Robustheit und Geschwindigkeit nicht erfüllen.

Tabelle 2.2 beurteilt die Regelkonzepte nach den Kriterien *Verbreitung*, *erreichbare Regelgüte*, *Preis*, *Robustheit* und der *Komplexität* des verwendeten Regelkonzepts.

Tab. 2.1: Literaturübersicht verschiedener CO- und CO-O₂-Regler

Quelle	Zusammenfassung
Padinger [2]	In diesem Bericht skizziert Padinger bereits erste Ansätze einer kohlenmonoxidbasierten Regelung (als CO-O ₂ -Kombinations-Regler). Die Regelung wird dem Vorbild größerer Anlagen im Bereich mehrerer MW nachempfunden und wurde übertragen auf Kleinfeuerungsanlagen. Des Weiteren beschäftigt sich Padinger mit Leistungsregelungskonzepten.
Hofmann [53] und Hasler [60, S.1441 ff.]	Diese Arbeiten beschäftigen sich mit der Thematik inwieweit Fuzzyregler zur Regelung von Kleinfeuerungsanlagen geeignet sind. Hierbei handelt es sich um CO- und sauerstoffbasierte Regelungen.
Good und Nussbaumer [61]	Verschiedene Verfahren zur Regelung einer Stückholzfeuerung werden vorgestellt und verglichen.
Good [16]	Eine CO- und CO-λ-Regelstrategie für automatisch beschickte Anlagen wird vorgestellt.
Diez [56]	Eine CO-Regelstrategie für einen Pelletofen basierend auf statistischer Auswertung der CO-Konzentration wurde an einem Pelletofen eingesetzt.
Völkel [58]	Diese Dissertation beschäftigt sich mit CO-Kantenregelung. Im Fokus der Arbeit steht zudem die verwendete CO-Sensorik.
Pitel und Mizak [29]	In dieser Arbeit werden neuronale Netze zur Approximation der optimalen Luftzahl verwendet.
Zipser [62]	Zipser gibt eine gute Übersicht über die Regelung von Verbrennungsprozessen und gibt zahlreiche Anregungen im Bereich infrarotbasierte Analyse von Verbrennungsprozessen.
Struschka et al. [63]	Projektbericht für Untersuchungen an einer Getreidefeuerung. Ziel war mitunter ein CO-basiertes Regelsystem für Getreidefeuerungen zu entwickeln. Die unvollständig beschriebenen Algorithmen sind nach Ermessen des Autors nicht praxistauglich.

Tab. 2.2: Sensorik für Kleinfeuerungsanlagen und deren qualitative Bewertung. Im Vordergrund stehen für viele Hersteller die Kriterien: Preis, Robustheit und erreichbare Regelgüte.

Sensorik	Verbreitung	Erreichbare Regelgüte	Finanzieller Aufwand	Robustheit	Regelungstechnik	Anmerkung
O ₂	häufig	+	++	++	einfach	Standardkonzept
CO	keine	++	-	+	sehr aufwendig	bisher keine geeignete Regelungstechnik vorhanden
O ₂ +CO	selten	+++	--	+++	aufwendig	nur als universitären Prototypen
ungeregelt	häufig	---	+++	--	keine	nur bei kleinen Anlagen und im <i>low-cost</i> -Preissegment

2.5 Bestehender Forschungsbedarf

Wie im Kapitel „Stand der Technik“ gezeigt wurde, existieren bereits vereinzelte empirische Ansätze und Ideen zur Regelung von Feuerungsanlagen mittels der O_2 und CO-Konzentration. Allen gemein sind folgende Nachteile:

Zu lange Optimierungsdauern: Die bisher beschriebenen Algorithmen benötigen lange Zeitintervalle zur Optimierung der Sauerstoffkonzentration. Dies widerspricht der typischen Betriebsweise der meisten Biomassefeuerungen, welche sich modulierend an den aktuellen Wärmebedarf anpassen oder unter Vollast innerhalb eines kurzen Intervalls einen Wärmespeicher beladen.

Fehlende Robustheit: Die existierenden Algorithmen weisen nicht die notwendige Robustheit bezüglich der in kleinen Biomassefeuerungen auftretenden stochastischen Schwankungen auf. Sowohl die Sauerstoffkonzentration, als auch die Kohlenmonoxidkonzentration und auch die CO- λ -Charakteristik selbst unterliegen starken stochastischen Schwankungen. Für diesen praxisüblichen Bedingungen sind bisher keine geeigneten Konzepte bekannt.

Keine Validierung unter praxisüblichen Bedingungen: Die bisher vorgestellten Regelkonzepte wurden meist nicht unter praxisüblichen Störeinflüssen getestet, sondern nur bei stationären Zuständen überprüft. Detaillierte Validierungen sind entweder nicht durchgeführt oder nicht publiziert worden.

Die vorliegende Arbeit erhebt den Anspruch diese Defizite des momentanen Stands der Technik bzw. Forschung zu beheben. Außerdem werden bestehende CO- λ -Regelkonzepte, welche bisher stark durch empirische Vorgehensweisen geprägt sind, durch moderne regelungstechnische Methoden erweitert. Desweiteren werden zahlreiche Einzelfragestellungen von CO-basierten Regelsystemen diskutiert und Verbesserungen für bestehende Sauerstoffregelung illustriert.

3 Methodik

3.1 Messwerterfassung

Im Folgenden muss für die Messwerterfassung in „Messwerterfassung für den Regler“ sowie „Messwerterfassung für die Auswertung“ unterschieden werden. Werden Gaskonzentrationen ohne Index *RGA* aufgeführt, sind damit die direkten (feuchten) O₂- und CO-Konzentrationen der *insitu*-Gasmesstechnik gemeint (z.B. Lambdasonde). Diese Konzentrationen stehen anschließend für die Regelung zur Verfügung. Im Gegensatz dazu, basieren alle Diagramme und Auswertungen ausschließlich auf Messungen mittels einer klassischen Rauchgasanalytik und sind daher indiziert mit der Abkürzung *RGA*. Die Abgasprobe wird hierbei über einen Vorfilter, eine Pumpe und einem Messgaskühler zur Gasanalytik geführt. Grundsätzlich werden beheizte Schläuche verwendet um mögliche Kondensation zu vermeiden. Im Messgaskühler wird der vorhandene Wasserdampf größtenteils kondensiert, die Messung findet also im trockenen Abgas statt. Eine Auflistung der eingesetzten Gasanalytik ist in 3.1 zu finden.

Tab. 3.1: Übersicht der Messgeräte, Messprinzipien und Messbereiche.

Messgröße	Messgerät	Messprinzip	Messbereich
O ₂	Oxydos	Paramagnetismus	0- 25 Vol. – %
CO	Rosemount Binos 100	nichtdispersive Infrarotabsorption	0-1000 ppm
CO	Rosemount Binos 100	nichtdispersive Infrarotabsorption	0- 1 Vol. – %
CO ₂	Rosemount Binos 100	nichtdispersive Infrarotabsorption	0-20 Vol. – %

Im Folgenden werden die verwendete *insitu*-CO-Sensorik (3.1.1) und Massenstromsensorik (3.1.2), welche zur Messung der eingehenden Luftmassenströme verwendet wurde, näher erläutert.

3.1.1 Eingesetzte Insitu-CO-Sensorik

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Arbeiten zu CO-Sensorik für Kleinfeuerungsanlagen [57, 64, 18, 19, 9, 34] veröffentlicht. Diese Arbeiten beschäftigten sich mit Themen wie Langlebigkeit, Temperaturbeständigkeit, Genauigkeit, Querempfindlichkeit dieser Sensoren und summa summarum deuten die bisherigen Ergebnisse auf eine grundsätzliche Eignung der Sensoren für den Betrieb in Biomassekleinfeuerungsanlagen hin. Auf eine detaillierte Analyse der Ergebnisse dieser Arbeiten soll jedoch verzichtet und auf die entsprechenden Quellen verwiesen werden. Eine Untersuchung der Gassensorik soll nicht Gegenstand dieser Arbeit sein. Vorab sind zwei Annahmen zu treffen: Es steht grundsätzlich eine CO-Sensorik zur Verfügung, welche

- die mechanische, chemische und thermische Stabilität aufweist, die bei Biomassefeuerungen notwendig ist
- und welche in der Lage ist grundsätzliche Tendenzen der CO-Konzentration zu messen.

Mit einigen Herausforderungen ist jedoch zu rechnen. Zum einen ist das Langzeitverhalten unter typischen Verbrennungsbedingungen noch nicht vollständig geklärt. Ein Sensoroffset, sowie eine Veränderung der Sensitivität ist auf Grund von Alterungsprozessen zu erwarten. Das Regelkonzept muss in der Lage sein, diese langfristigen Veränderungen zu kompensieren. Für die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Regelkonzepte ist daher kein exakter Absolutwert der CO-Konzentrationen notwendig. Offset, unterschiedliche Sensitivität in verschiedenen Messbereichen und Nichtlinearität sind von untergeordneter Bedeutung, da die Regelkonzepte ausschließlich auf Relativgrößen basieren. Es ist ausreichend, wenn eine unbekannt streng monoton steigende Funktion $f()$ zwischen der tatsächlichen CO-Konzentration und dem Messsignal y existiert ($\exists f : c_{CO} = f(y), \quad a < b \rightarrow f(a) < f(b)$). Stetigkeit ist nicht zwingend erforderlich, jedoch wünschenswert.

Momentan sind mindestens zwei Sensoren am Markt erhältlich, welche die oben angeführten Anforderungen erfüllen.

Zum Einen kam der keramischer Festkörperelektrolyt mit der Bezeichnung *Carbosen* der Firma Lamtec zum Einsatz. Dieser potentiometrisch arbeitende Sensor dient zur Detektion von brennbaren Gasen. Im Folgenden wird zusammenfassend auf sein Funktionsprinzip eingegangen. Ausführlichere Beschreibungen können in [65] gefunden werden. Im Gegensatz zur klassischen Elektrolyse im flüssigen Elektrolyt wird die von Nernst entdeckte Eigenschaft bestimmter fester Stoffe genutzt, bei hohen Temperaturen leitfähig zu werden. Zirkondioxid (ZrO_2) wird mit Dyttriumtrioxid Y_2O_3 dotiert und es entsteht ein sogenanntes yttriumstabilisiertes Zirkondioxid (YSZ) welches sich durch hohe mechanische und chemische Stabilität auszeichnet. Im Gitter des YSZ existieren niedervalente Y_3O_3

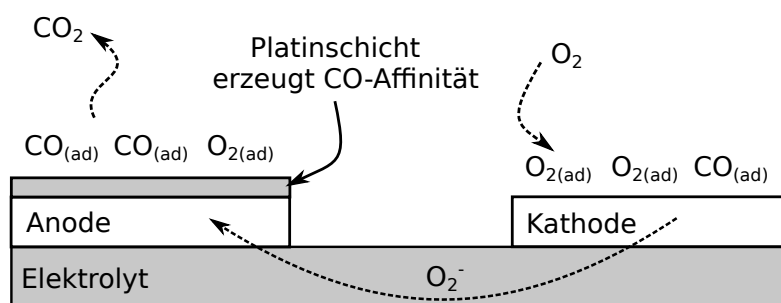


Bild 3.1: Vereinfachtes Modell des Nicht-Nernst'schen Sensors. Abbildung nach Kunstfeld [65].

Defektstellen, beziehungsweise Sauerstoffleerstellen. Durch diese kommt es bei hohen Temperaturen ($> 400^\circ C$) zu Ionenleitfähigkeit, da Sauerstoffionen ihren Gitterplatz wechseln und dabei erneut eine Sauerstoffleerstelle hinterlassen. Hierdurch ist ein Transport von Sauerstoffionen (O_2^-) möglich. Die Ionenleitfähigkeit ist bei Raumtemperatur für messtechnische Anwendungen zu gering und daher wird der Festkörperelektrolyt typischerweise auf Betriebstemperaturen über $600^\circ C$ erwärmt. Für die Anwendung als CO-Sensorik wird der Festkörperelektrolyt in einer Nicht-Nernst'schen Sonde eingesetzt. Im Gegensatz zur Nernst'schen Sonde befinden sich beide Elektroden (Anode und Kathode) im Messgas. Ein messbares Potential entsteht dadurch, dass die Adsorptionseigenschaften sowie die katalytischen Eigenschaften einer der beiden Elektroden verändert wird [58]. Durch aufgebrachtetes Platin kann eine hohe CO-Affinität an einer der Elektroden erzeugt werden, was zu einer deutlich geringeren Adsorption der Sauerstoffmoleküle führt. Abbildung 3.1 zeigt das vereinfachte Funktionsprinzip des Sensors. Dargestellt ist die mit Platin beschichtete Anode sowie die Kathode. Der Sauerstoffionenfluss von der Kathode zur Anode sowie die anschließende Reduktion zu CO_2 mit dem CO sind ebenfalls verdeutlicht. Im Grunde sind zwei Bruttoreaktionen für den Sensor von Bedeutung.



Auch andere oxidierbare Gase, wie beispielsweise H_2 oder Kohlenwasserstoffe reagieren auf der Sensoroberfläche und eine Differenzierung in die Einzelkomponenten ist mit dem Carbosensor nicht möglich. Für Biomassefeuerungen kann jedoch, für nahezu alle (verbrennungstechnisch sinnvollen) Betriebszustände, gewährleistet werden, dass die Kohlenmonoxidkonzentration gegen über anderen Gasen dominiert. Auf eine vollständige Auflistung der Einzelreaktionen wird an dieser Stelle verzichtet und auf Völkel [58, S.21] verwiesen. Der Hersteller verweist darauf, dass es sich um eine Messung einer CO-äquivalenten Konzentration handelt. Die Diskussion ob nun CO direkt oder CO-äquivalent (CO_e) gemessen wird, spielt für diese Arbeit eine untergeordnete Rolle und soll an dieser

Stelle nicht weiter behandelt werden. Wichtig aus regelungstechnischer Sicht ist, dass aus der Differenz der Elektrodenpotentiale sich eine gute Schätzung der im Messgas befindlichen CO-Konzentration berechnen lässt.

Für die Versuche zur Validierung des Regelkonzeptes wurde nicht der Carbosensor sondern der Kombinationssensor KS1D eingesetzt, da mit diesem sowohl Sauerstoff als auch Kohlenmonoxid gleichzeitig gemessen werden konnte. Die Kombisonde *KS1D* von Lamtec dient der direkten Bestimmung der Sauerstoffkonzentration, sowie der Messung von brennbaren Rauchgaskomponenten (hauptsächlich H_2 , CO). Die Sonde kann direkt im Rohgas bei bis zu $450\text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden. Der typische O_2 -Messbereich liegt bei 0 bis 21 Vol. – %. Für die COe-Messung sind zumindest im Lastenheft ein Bereich von 0 bis 10 000 ppm angegeben. Die Erfahrung mit den Sensoren zeigt jedoch, dass insbesondere im Bereich von weniger als 100 ppm die relative Messgenauigkeit erheblich abnimmt. Wichtiger Vorteil dieses Sensors ist, genau wie beim CarboSen, dass sie direkt im feuchten Abgas eingesetzt werden kann und die Messung damit direkt insitu stattfindet. Eine Trocknung, Filterung oder Verdünnung des Abgases ist somit nicht notwendig. Die KS1D benötigt eine Heizleistung von 20 W bis 25 W, abhängig von der Abgastemperatur. Die bisherigen Erfahrungen deuten darauf hin, dass sich der Kombinationssensor für die Verwendung im Dauerbetrieb in einer Biomassefeuerung eignet. Das Mischpotential stellt sich an am Sensor innerhalb weniger Sekunden ein (vom Hersteller angegebene T_{60} -Zeit der CO-Sensorik beträgt unter 2 s). Als Nachteil ist zu werten, dass vom Hersteller empfohlen wird, die Kombisonde anlagenspezifisch zu kalibrieren [66]. Eine Genauigkeit von $\pm 25\%$ und eine Querempfindlichkeit bezüglich der Komponenten SO_2 , NH_3 , NO, Propan und aromatischen Kohlenwasserstoffen werden angegeben. Desweiteren wurden deutliche Querempfindlichkeiten bezüglich Rauchgastemperatur sowie Sauerstoffkonzentration in [34] nachgewiesen.

In dieser Arbeit wurde ein Modell zur Kompensation der Querempfindlichkeiten verwendet, welches vor allem die Querempfindlichkeit der angezeigten CO-Konzentration bezüglich der Sauerstoffkonzentration kompensiert. Für eine detaillierte Beschreibung des Modelles sei auf Rumpf [34] verwiesen. Die folgenden Aspekte lassen sich für die CO-Sensorik zusammenfassen.

Zusammenfassung CO-Sensorik:

- Die beiden Sensoren KS1D und Carbosen der Firma Lamtec wurden in dieser Arbeit verwendet. Für die Validierung des Reglerkonzeptes bewährte sich die KS1D und wurde aufgrund der simultanen Messung von CO und O₂ präferiert.
- Beide Sensoren schließen mittels der brennbaren Anteile im Abgas auf die CO-Konzentration. Beide weisen starke Querempfindlichkeiten auf und es ist nicht mit einer präzisen CO-Messung zu rechnen – entsprechende regelungstechnische Robustheit bezüglich Messfehlern ist erforderlich.

3.1.2 Luftmassenstrommessung

Zur Luftmassenstrommessung bei Feuerungsanlagen kommen (zumindest am Prüfstand) drei Technologien zum Einsatz. Zum einen die günstige und robuste Variante über die indirekte Messung durch Druckabfall an einer Blende, welche deutlich kürzere Vor- und Nachlaufstrecken ermöglicht, was im Besonderen bei großen Rohrdurchmessern von Bedeutung ist. Die Berechnung des Massenflusses über den Druckabfall gilt im Allgemeinen robust gegenüber Verschmutzungen. Aus diesen Gründen wird diese Messmethode vor allem auf der Abgasseite und bei größeren Feuerungen eingesetzt. Als Nachteil ist die aufwändigere Identifikation der Parameter zu nennen, die nötig ist, um vom Druckabfall auf den Volumenstrom schließen zu können. Arbeiten zur Verwendung von Drucksensorik zur Massenstromberechnung in Feuerungen sind unter [47, 45, 46] zu finden.

Die zweite Variante stellt das Prandtl'sche Staurohr dar, durch welches man über den sich einstellenden Staudruck auf den Luftmassenstrom schließen kann. Hierbei können Verschmutzungen einen signifikanten Einfluss auf die Messgenauigkeit haben.

Als letzte Variante kann thermische Massenflusssensorik (sogenannte Heißfilmsensorik) eingesetzt werden um kalte Luftmassenströme, deren Dichte und Temperatur präzise bekannt sind, zu messen. Sie gelten im Allgemeinen als präziser, sind jedoch überaus anfällig für Verschmutzungen und üblicherweise ungeeignet für typische Abgastemperaturen von Kleinf Feuerungsanlagen. Diese können daher ausschliesslich auf der Zuluftseite der Anlage verwendet werden. Die in dieser Arbeit eingesetzte Sauerstoffregelung (vgl. Kapitel 4.8.6) greift auf die Messung der Luftmassenströme durch Heißfilmsensoren an den Zuluftöffnungen zurück.

3.2 Eingesetzte Hackschnitzelrostfeuerung

Für die experimentelle Validierung wurde eine moderne 30 kW-Hackschnitzelfeuerung eingesetzt. Die Experimente wurden bei der Bioenergy2020+ GmbH in Graz durchgeführt. Abbildung 3.2 zeigt die wichtigsten Komponenten der Flachschiebung. Über ein Förderschneckensystem wird der Brennstoff in die Feuerung eingetragen und mittels beweglicher Rostelemente entlang des Rostes verschoben. Durch Einbringen der Sekundärluft oberhalb des Brennstoffbettes wird eine gestufte Verbrennung erreicht. Das heiße Rauchgas tritt anschließend in den Wärmeübertrager ein. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in der Skizze die thermische Ablaufsicherung sowie Rückbrandsicherung, Brennstoffschleuse und Brennstoffbehälter nicht eingezeichnet.

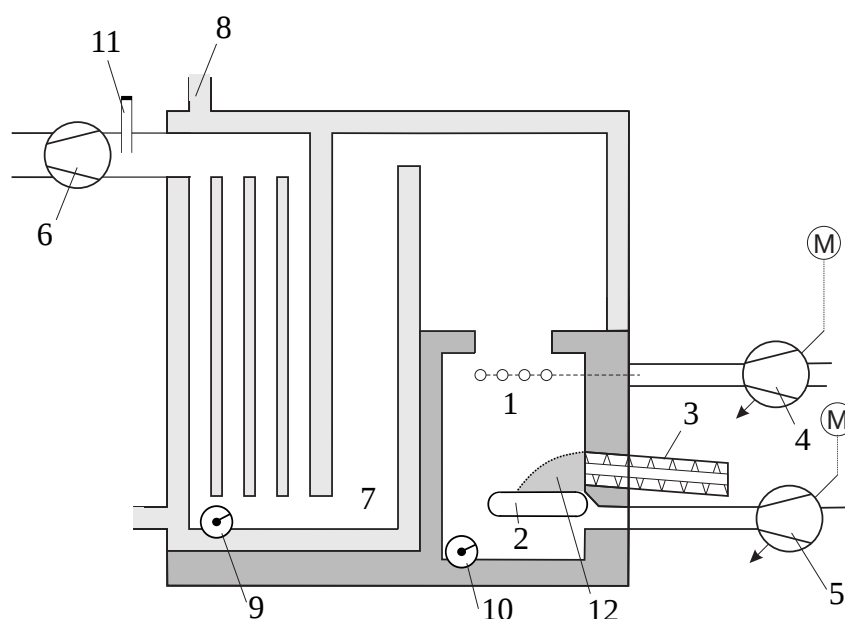


Bild 3.2: Schema der Hackschnitzelfeuerung. Mit (1) Sekundärluftdüsen, (2) bewegter Rost, (3) Förderschnecke zur Brennstoffversorgung, (4) Sekundärgebläse massenstromgeregelt, (5) Primärgebläse massenstromgeregelt, (6) Rauchgasgebläse, (7) Eintritt Wärmetauscher, (8) Anschluss Hydraulik, (9) Ascheausstragung des Wärmetauschers, (10) Ascheausstragung in der Primärzone, (11) CO- und O₂-Sensorik und schliesslich (12) Glutbett.

3.3 Regelungstechnische Definitionen und Begriffe

Im Folgenden seien einige grundlegende regelungstechnische Begriffe definiert, welche in dieser Arbeit häufiger verwendet werden. Der regelungstechnisch geschulte Leser möge dieses Kapitel überspringen.

Die Komponenten Regelstrecke und Regler bilden gemeinsam einen Regelkreis. Die Regelstrecke lässt sich außerdem unterteilen in Messglied, Störgrößenverhalten, Stellverhalten und gegebenenfalls Stellglied. Abbildung 3.3 zeigt das Blockdiagramm des

Reglers.

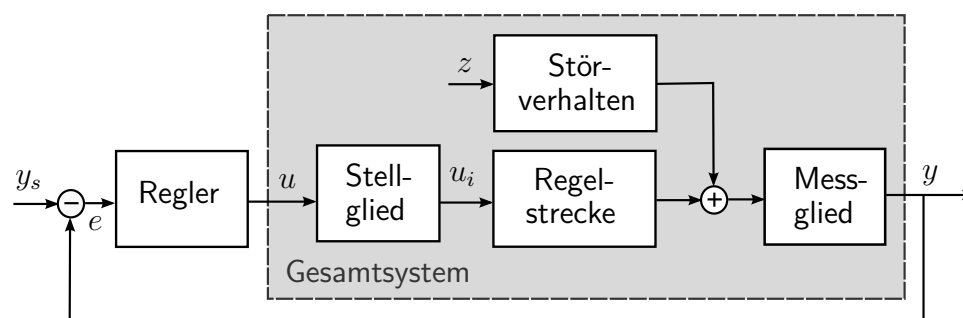


Bild 3.3: Allgemeine Reglerstruktur.

Hierbei bedeutet:

y	Regelgröße	y_s	Führungsgröße	u	Stellgröße
e	Regelabweichung	z	Störgröße		

Außerdem sind folgende regelungstechnische Begriffe für die vorliegende Arbeit von Bedeutung:

Linearität: Für lineare Systeme gilt das Superpositionsprinzip. Das bedeutet unter Anregung der beiden Zeitfunktionen $u_1(t)$ und $u_2(t)$, kann die Systemantwort als Überlagerung der Systemantworten von $u_1(t)$ und $u_2(t)$ gebildet werden. Alle Systeme für welche das Superpositionsprinzip nicht gilt, werden als nichtlinear bezeichnet. Mit der Übertragungsfunktion \mathbb{G} , den Eingängen $u_i(t)$ und Ausgängen $y_i(t)$ muss gelten:

$$\sum_i y_i(t) = \sum_i \mathbb{G} \{u_i(t)\} = \mathbb{G} \left\{ \sum_i u_i(t) \right\}. \quad (3.3)$$

Zustandsraumdarstellung: Für die Formulierung des Kalmanfilters wird meist die Zustandsraumdarstellung statt der Darstellung im Frequenzbereich herangezogen. Im Anhang ist die entsprechende Beschreibung und Definition zu finden.

Fourier Transformation: Die Fourier Transformation bezeichnet eine Methode, welche erlaubt Signale (kontinuierlicher oder diskreter Form) in Spektren zu überführen. Insbesondere zur Generierung von Simulationsdaten zur Validierung des Reglerkonzeptes wurde die Methode verwendet.

Übertragungsfunktion: Die Übertragungsfunktion – aus der Systemtheorie kommend – bezeichnet den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgängen eines System im Frequenzraum.

PID-Regler: Der PID-Regler (proportional–integral–derivative controller) ist der wohl am häufigsten eingesetzte Standardregler und wird in dieser Arbeit in vielfältiger Art und Weise eingesetzt. Typische Einsatzmöglichkeiten reichen von Unterdruckregelungen, Massenstromreglern bis hin zu Sauerstoffreglern.

Modellbasierter Regler: Neben modellfreien Regelkonzepten kann durch Bestimmung eines Systemmodells die Regelgüte massgeblich verbessert werden. In dieser Arbeit kommen beispielsweise modellbasierte Regler (MBR) zur Regelung der Leistung und Sauerstoffkonzentration zum Einsatz.

3.4 Zeitlich hochaufgelöste CO- λ -Charakteristik

Bisher gezeigte CO- λ -Charakteristiken wurden immer direkt aus den Messdaten bestimmt ohne vorab gemittelt zu werden. Dies entspricht nicht der üblichen Praxis und in diesem Kapitel wird daher auf die Unterschiede sogenannter (*zeitlich-*) *hochaufgelöster* und *gemittelter* CO- λ -Charakteristik eingegangen.

In der Literatur wird die CO- λ -Charakteristik meist über das Messen mehrerer stationärer Arbeitspunkte und Mittelung über das Versuchsintervall bestimmt. Über mehrere Arbeitspunkte kann auf die Form der CO- λ -Charakteristik geschlossen werden (*gemittelte* Betrachtung der CO- λ -Charakteristiken). In dieser Arbeit wird auf diese Art der Betrachtung weitestgehend verzichtet, da sie wichtige Eigenschaften der CO- λ -Charakteristik vernachlässigt. Zwei der wichtigsten Aspekte, welche hierbei vernachlässigt werden sind:

Rauschen der O₂- und CO-Konzentrationen: Durch die Mittelung geht die zeitliche Information der O₂- und CO-Konzentrationen verloren. So geht beispielsweise die Information verloren, ob einzelne CO-Spitzen oder eine generelle Verschlechterung des Ausbrands für einen Anstieg der mittleren CO-Emissionen verantwortlich sind. Auch wenn es für einen gesetzlich einzuhaltenden Grenzwert irrelevant ist, ob die CO-Emissionen auf einzelne Spitzen oder auf mittelfristige Emissionen zurückzuführen sind, steckt im zeitlichen Verlauf ein hoher Informationsgehalt. In dieser Arbeit wird dieser Informationsgehalt, wie an späterer Stelle verdeutlicht, dafür verwendet, die CO- λ -Regelung deutlich zu verbessern.

Abhängigkeit vom O₂-Regler: Werden Mittelwerte betrachtet, sind die CO-Emissionen abhängig davon, wie gut der Sauerstoffregler der Anlage eingestellt ist. Höhere Sauerstoffschwankungen bei identischem Sauerstoffmittelwert führen zu höheren Emissionen¹ und bilden daher nicht die exakte CO- λ -Charakteristik ab. Unter-

¹ Das höhere Sauerstoffschwankungen bei identischem Sauerstoffmittelwert zu höheren CO-Konzentrationen führen, ergibt sich aus der Konvexität der CO- λ -Charakteristik.

schiedliche Sauerstoffregler erzeugen damit auch geringfügig unterschiedliche CO- λ -Charakteristiken.

Auf Grund dieser eben erwähnten Nachteile wird – entgegen der üblichen Praxis – die CO- λ -Charakteristik immer ungemittelt betrachtet. Das bedeutet, dass die CO- λ -Charakteristik durch stochastische und deterministische Änderung des Sauerstoffgehaltes und der daraus resultierenden CO-Emissionen entsteht. Wenn CO- λ -Charakteristiken in Abbildungen gezeigt sind, beziehen sich diese immer auf die hochaufgelösten Messwerte und nicht auf zuvor gemittelte Messwerte aus verschiedenen Experimenten. Im Folgenden wird der Begriff „CO- λ -Charakteristik“ aus Gründen der Übersichtlichkeit immer für die (zeitlich-) hochaufgelöste CO- λ -Charakteristik verwendet. Als weiteres Argument für dieses Vorgehen sei natürlich zu nennen, dass eine CO-basierte Regelung natürlich immer nur in Echtzeit die hochaufgelöste CO- λ -Charakteristik „beobachten“ kann.

4 Regelung durch Kohlenmonoxid- und Sauerstoffmessung

Während für kleine Anlagen, wie beispielsweise für Einzelraumheizungen, eine Kombination aus Lambdasonde und CO-Sensorik nur in den wenigsten Fällen wirtschaftlich rentabel ist, kann für größere Anlagen, wie beispielsweise mittelgroße Hackschnitzelanlagen diese Kombination auch wirtschaftlich im Bereich des Möglichen sein. Wie bereits im Kapitel 2.4.3 „Stand der Technik“ illustriert wurde, existieren bisher keine ausgereiften Regelungskonzepte, welche beide Größen (O_2 und CO) zur Regelung der Feuerung verwenden und den praxisüblichen Anforderungen Genüge tun. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Algorithmen den optimalen Sauerstoffgehalt bestimmen, ist hierbei für die meisten Algorithmen die limitierende Größe. In diesem Kapitel wird ein neu entwickeltes CO- λ -Regelsystems vorgestellt, welches die bestehende Problematik durch direkte Schätzung der CO- λ -Charakteristik auflöst. Zu Zwecken der Validierung, werden ab Kapitel 5.2 Versuchsreihen mit und ohne das neue Regelsystem an einer 30 KW-Hackschnitzanlage diskutiert.

4.1 Anforderungen an CO-basierte Regelkonzepte

Das Regelkonzept muss diverse Anforderungen erfüllen, die zum einem den praktischen Einsatz ermöglichen, zum anderen dem komplexen regelungstechnischen Problem gerecht werden. Im Folgenden seien die wichtigsten Anforderungen dargestellt und die daraus resultierenden Schwierigkeiten skizziert. Die wichtigsten Anforderungen an das Regelkonzept bestehen aus:

Zuverlässige Detektion des Minimums, auch bei Drift des Systems: Bei einer Vielzahl von Kesseln und Öfen sind stationäre Bedingungen nur über kurze Intervalle oder überhaupt nicht vorhanden. Die Regelung muss daher in der Lage sein, sich an den aktuellen Systemzustand anzupassen und langfristige Trends zumindest in festen Zeiträumen auszugleichen. Hierbei handelt es sich um einen Drift, der beispielsweise durch die thermische Trägheit des Systems oder auch aus wechselnder Brennstoffzusammensetzung resultieren kann. Als weitere typisch auftretende Drifts sind beispielsweise das langsame Zusetzen des Brennstoffrostes oder eine Verschmutzung

des Sensors zu nennen.

Echtzeitfähigkeit des Algorithmus: Die zur Verfügung stehende Rechenleistung ist aus Kostengründen im Vergleich zu Großfeuerungsanlagen verhältnismäßig klein. Typischerweise werden kleine Mikroprozessoren oder SPS-Systeme zur Steuerung des Verbrennungsprozesses verwendet und diese setzen der Komplexität des Algorithmus gewisse Beschränkungen. Der starke Preisverfall elektronischer Komponenten wird in Zukunft deutlich mehr Spielraum schaffen, zum jetzigen Zeitpunkt sind jedoch bestimmte Regelverfahren (wie beispielsweise nichtlineare modellprädiktive Regelung [44]) nur eingeschränkt einsetzbar.

Robustheit gegen stochastische Störungen: Sauerstoffbasierte Regelungen basieren in den meisten Fällen auf der Idee, auftretende stochastische Schwankungen des Verbrennungssystems zu dämpfen oder sogar vollständig zu kompensieren. Für sehr langsame Störungen (z.B. Schornsteinzug bedingt durch Wetterlage oder langsame Leistungsänderung) ist dies meist¹ gut geeignet. Reine CO-Regelsysteme sind nicht in der Lage Störungen zu dämpfen. Rein CO-basierte Regelsysteme müssen daher mit besonders starken stochastischen Schwankungen der Messwerte zurecht kommen.

Robustheit gegen Sensorfehler: Auch wenn die CO-Sensorik in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht hat und die Lambdasonde technisch ausgereift ist, muss von erheblichen Messfehler der Sensorik ausgegangen werden. Im Besonderen unter schwierigen Bedingungen (z.B. tiefe O₂ und hohe CO-Konzentrationen) sind bei der CO-Sensorik Abweichungen in der Größenordnung von 100 % und bei der O₂-Sensorik in der Größenordnung von 15 % zu erwarten. Alterung und Verschleiß der Sensoren sorgen für weitere Messfehler.

Schwache Parameterabhängigkeit: Für den praktischen Einsatz ist es insbesondere erforderlich, dass das Regelungskonzept nur von einer geringen Anzahl von Einstellparametern abhängig ist. Diese sind in zwei Kategorien zu unterteilen. Zum einen feuerungsspezifische Einstellungen, welche bereits vorab vom Kesselhersteller vorkonfiguriert werden können. Zum anderen benutzerspezifische Einstellungen oder Optimierungen, welche nach Einbau des Brenners konfiguriert werden. Diese können dem Nutzerverhalten angepasst werden und es ist im Besonderen darauf zu achten, dass diese intuitiv vom Betreiber oder Schornsteinfeger einstellbar sind. Beide Arten von Parametern sollten jedoch auf ein Minimum reduziert werden. Um einen Vergleich zu liefern: Für klassische sauerstoffbasierte Regelsysteme sind üblicherweise zwischen 2-4 brennerspezifische Einstellungen notwendig. Ein neues Regelkonzept

¹ Mit Ausnahme von Sensordrift: Eine langfristigen Verschmutzung des Sauerstoffsensoren führt in den vielen Fällen zu einer signifikanten und langfristigen Verschlechterung des Verbrennung.

sollte diese Zahl nicht deutlich überschreiten, da sonst die Nutzerakzeptanz eines solchen Regelsystems auf Grund der zusätzlichen Komplexität abnehmen würde. Das impliziert im Besonderen, dass einfache Modelle verwendet werden sollten, da eine präzise physikalische Modellierung (wie beispielsweise in [47]) oftmals zahlreiche Modellparameter erfordert.

Minimierung von Adaptionen an verschiedene Brenntypen: Grundsätzlich soll das Regelkonzept an eine breite Klasse von Brenntypen anpassbar sein. Fokus des vorgestellten Konzepts sind automatisch beschickte Anlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich. Typische Anwendungen des Regelkonzeptes sind Hackschnitzelfeuerungen zwischen 20 kW bis 300 kW. Auch für alternative Brennstoffe (vor allem Brennstoffe wechselnder Qualität) ist deutliches Potenzial des Regelkonzeptes prognostizierbar.

Unabhängigkeit von der Form der Charakteristik: Das Regelkonzept muss in der Lage sein sich an verschiedene CO- λ -Charakteristiken anpassen zu können. Auf die Notwendigkeit einer vorhandenen CO-Kante sollte verzichtet werden. Die Ausprägung der CO-Kante, wie man sie von Öl- und Gaskesseln kennt, ist bei Biomassekesseln und -öfen oftmals weniger stark ausgeprägt.

Vertretbare Optimierungsdauer: Echtzeitoptimierung leidet grundsätzlich unter der Problematik, dass die Optimierung im Allgemeinen sehr langsam ist. Als Beispiel sei *extremum seeking* genannt, welches selbst unter optimalen Bedingungen zwischen 5 und 20 mal der langsamsten Systemdynamik benötigt, um den optimalen Arbeitspunkt zu erreichen. Angewendet auf Kleinf Feuerungsanlagen würde eine solche Optimierung mehrere Stunden benötigen. Dass die benötigte Optimierungsdauer sich mit dem typischen Betrieb von Kleinf Feuerungsanlagen vereinbaren lässt, stellt eine der zentralen Anforderungen an das Regelsystem dar.

Um bereits im Voraus testen zu können, ob ein Regelkonzept diesen Anforderungskatalog erfüllt, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Simulationsplattform entwickelt um CO-O₂-Regler simulativ zu validieren.

4.2 Bewertungsmaßstab für den Regler

Die klassischen Bewertungsmaßstäbe von Reglern wie die Anregelzeit, Ausregelzeit, Überschwingen und stationäre Abweichung oder ein quadratisches Gütefunktional eignet sich für die Bewertung von CO basierten Regelsystemen nur eingeschränkt. Vielmehr müssen andere Kriterien gefunden werden, um die Regelung zu bewerten. Eine Kennzahl, welche sich deutlich besser für die Bewertung eines CO-O₂-Regelsystems eignet, ist die *Optimierungsdauer*. Diese Kennzahl stellt dar, wie lange der Regler unter typischen Bedingungen

benötigt, um die optimale Sauerstoffkonzentration oder den optimalen Luftmassenstrom zu finden und das System in diesen Zustand zu fahren. Einziges Problem: Die Optimierungsdauer ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Von entscheidender Bedeutung ist beispielsweise, wie weit der Startwert vom tatsächlichen Optimum entfernt ist und wie präzise die Sauerstoffregelung den Sauerstoffwert regelt. In dieser Arbeit wird aus diesem Grund versucht auf eine absolute quantitative Bewertung der Optimierungsdauer zu verzichten und stattdessen relative oder qualitative Bewertungsmaßstäbe für die Optimierungsdauer heranzuziehen. Einer dieser Maßstäbe ist mitunter die entstehenden Gesamtkohlenmonoxidemissionen.

4.3 Simulationsumgebung zur Vorvalidierung des Regelkonzeptes

Eine der Herausforderungen bei der Optimierung der RTO-Algorithmen für die Anwendung an Kleinf Feuerungsanlagen sind die zeitaufwendigen Versuche. Um diesen Zeitaufwand zu reduzieren, aber auch um ein tiefgreifendes Verständnis für das dynamische Verhalten des Systems zu schaffen, ist eine Simulationsumgebung in MATLAB® konzipiert und implementiert worden. Das folgende Kapitel stellt in groben Zügen die Komponenten vor. Wie bereits zuvor betont, spielen die Komponenten *dynamisches Verhalten*, *stochastisches Störverhalten* (Rauschen) und *CO-Charakteristik* eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund finden sich diese Elemente auch im Simulator wieder.

Durch ein dynamisches Modell der Kleinf Feuerungsanlage können die typisch auftretenden Effekte wie Dämpfung, *inverse-response*-Verhalten und Totzeiten, die bei Änderung des Aktors für die Luftzufuhr auftreten, dargestellt werden. Die hierfür notwendigen mathematischen Modelle lassen sich entweder empirisch oder analytisch bestimmen. Durch Sprungversuche können beispielsweise die Totzeiten und Dämpfungskonstanten des Systems von Hand abgeschätzt werden oder es können analytische Modelle für die Biomasseverbrennung verwendet werden. In der vorliegenden Arbeit wurde ein alternativer und allgemeiner Ansatz verfolgt, in welchem das System durch Anregung mittels eines APRBS-Signals (Amplitude Modulated Pseudo Random Binary Sequences) identifiziert wurde. Die Systemschätzung erfolgt mittels des weitverbreiteten N4SID-Algorithmuses und das Modell liegt nach Schätzung in klassischer *state-space*-Darstellung vor. Die Daten werden zuvor mittelwertbereinigt und normiert, was die Schätzung der Übertragungsfunktionen deutlich verbessert. Detaillierte Beschreibungen für die Identifikation linearer Systeme sind in der Standardliteratur für Systemidentifikation für linearer Systeme (z.B [67], [68] oder auch [69]) zu finden und es bedarf an dieser Stelle keiner weiteren Ausführung.

In Abbildung 4.1 ist nun exemplarisch das simulierte Systemverhalten dem tatsächlichen gegenübergestellt. Ein erster Blick reicht bereits aus, um zu erkennen, dass die Mittelwerte zwischen Simulation und Messung durchaus getroffen wurden, jedoch kurzfristig

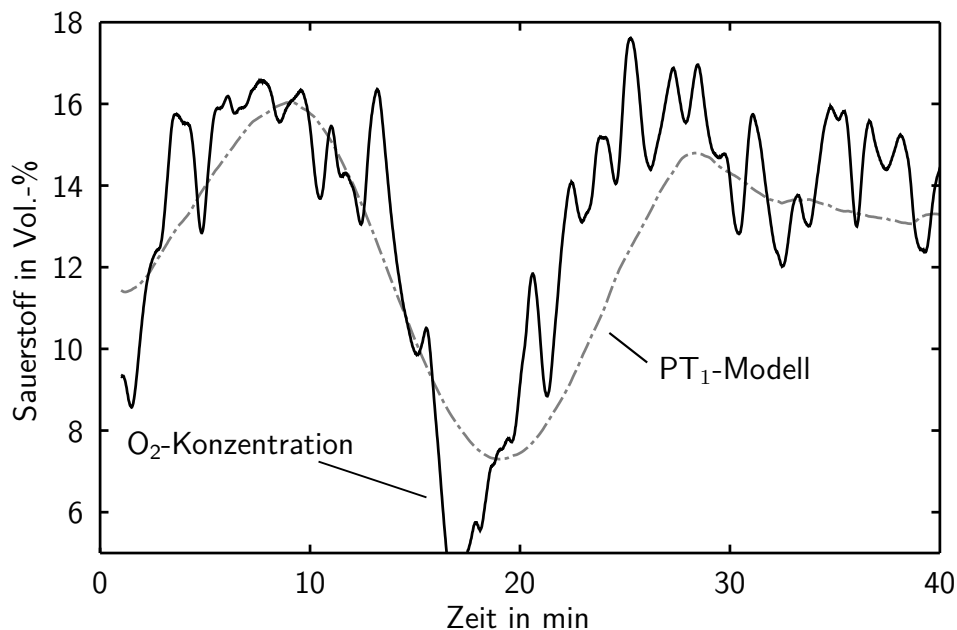


Bild 4.1: Identifiziertes Modell einer tatsächlichen Messung gegenübergestellt. Deutlich zu erkennen ist das hohe signal-to-noise Verhältnis daran, dass der Sauerstoffverlauf nicht vollständig modelliert wird. Zu beachten ist, dass bei dieser Identifikation (N4SID) ein Modell mit nur einem Freiheitsgrad ($N=1$) gewählt worden ist.

erhebliche Abweichungen zwischen Modell und Realität auftreten. Eine rein deterministische Modellierung der Feuerung scheint aus diesem Grund nicht hinreichend. Da für die Regelung von besonderem Interesse das Verhalten der stochastischen Anregung ist, wird im nächsten Schritt auf das bisher noch rein deterministische Signal aus dem dynamischen Modell ein stochastisches Rauschsignal aufaddiert. Dieses künstliche Rauschsignal sollte im besten Fall die gleichen stochastischen Eigenschaften aufweisen, wie die Messungen an der entsprechenden Kleinf Feuerungsanlage. Hierfür ist die spektrale Leistungsdichte des Rauschen von entscheidender Bedeutung. Wenn diese sich in Messung und Simulation ähneln, ist gewährleistet, dass die beiden Signale auch ähnliche stochastische Eigenschaften aufweisen. Aus Messungen an der Kleinf Feuerungsanlage kann die spektrale Leistungsdichte bestimmt werden. Hierzu werden von dem aufgenommenen Messsignal x die aus dem dynamischen Modell errechneten Werte x_{sim} abgezogen¹. Das verbleibende Signal besteht nun ausschließlich aus den stochastischen Anteilen x_{stoch} sowie einem vernachlässigbaren Modellierungsfehler. Abbildung 4.2 zeigt einen Auszug aus einer 8-stündigen Messung des Sauerstoffgehaltes (entspricht x), dem identifizierten Modell für den Sauerstoff (entspricht x_{sim}) und der daraus berechneten stochastischen Schwankungen x_{stoch} .

¹ für den Fall, dass alle Einstellungen konstant gehalten werden (also auch Luftzufuhr), entspricht dies einer Mittelwertsbereinigung.

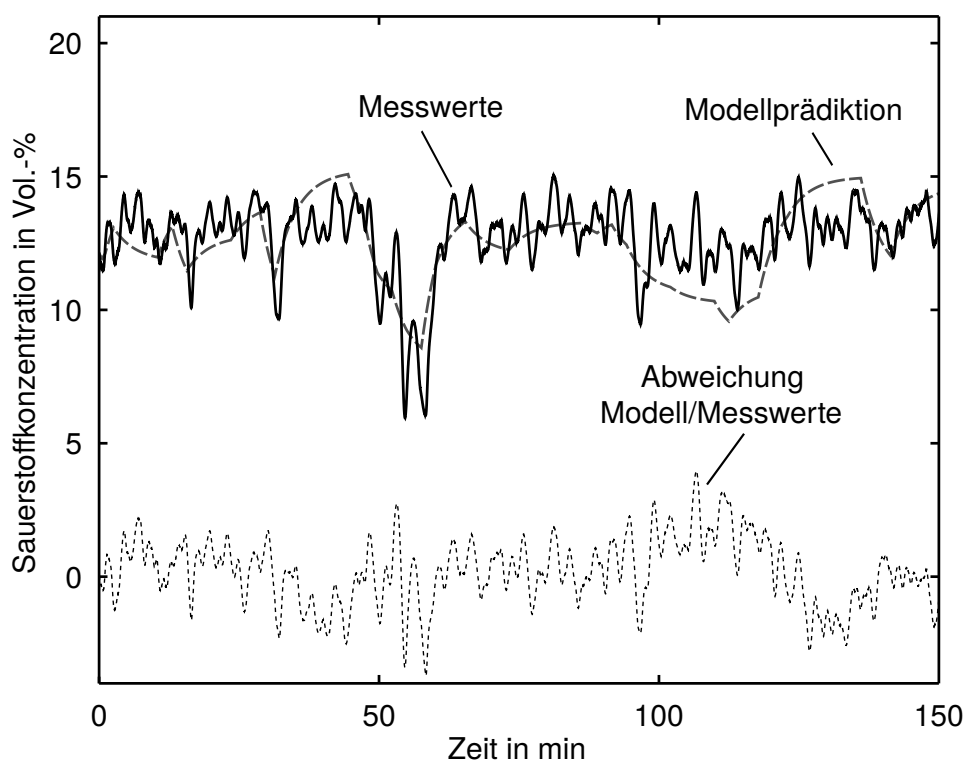


Bild 4.2: Simulationsergebnisse mit der Spannung am Ventilator als Eingang und Sauerstoffgehalt als Ausgang. Dargestellt ist die Messung (x), die Simulation (x_{sim}) und die Abweichung bzw. der stochastische Anteil (x_{stoch}).

Vom Rauschen des Sauerstoffsignals wird vereinfachend ausgegangen, dass es sich normalverteilt mit der Standardabweichung σ um den Erwartungswert μ verteilt. Abbildung 4.3 zeigt an einer 6-stündigen Messung, dass diese Annahme gerechtfertigt ist und die Sauerstoffschwankungen annähernd normalverteilt¹ sind (mit $\mu = 0.0077$ und $\sigma = 1.411$). Im Folgenden wird nun ein Verfahren beschrieben, wie aus den Messdaten ein zur Simulation geeignetes Signal erzeugt wird. Wichtig ist hierbei vor allem, dass die stochastischen Eigenschaften des Signals erhalten bleiben². Das Spektrum X_k eines abgetasteten diskreten Zeitsignals x_n mit $n \in \mathbb{Z}^+$ und der Samplinglänge N (also der Anzahl der Messungen) ist definiert als

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi \frac{kn}{N}} \quad (4.1)$$

1 Shapiro-Wilks-Test mit $\alpha = 0,1$ auf Normalverteilung kann jedoch nicht bestätigt werden. Trotz alledem ist die Annahme eines normalverteilten Rauschen für die Simulation als ausreichend bewährt.

2 Zum Thema *Rauschgenerierung* ist wenig Literatur zu finden, aus diesem Grund wird auf dieses Thema kurz genauer eingegangen.

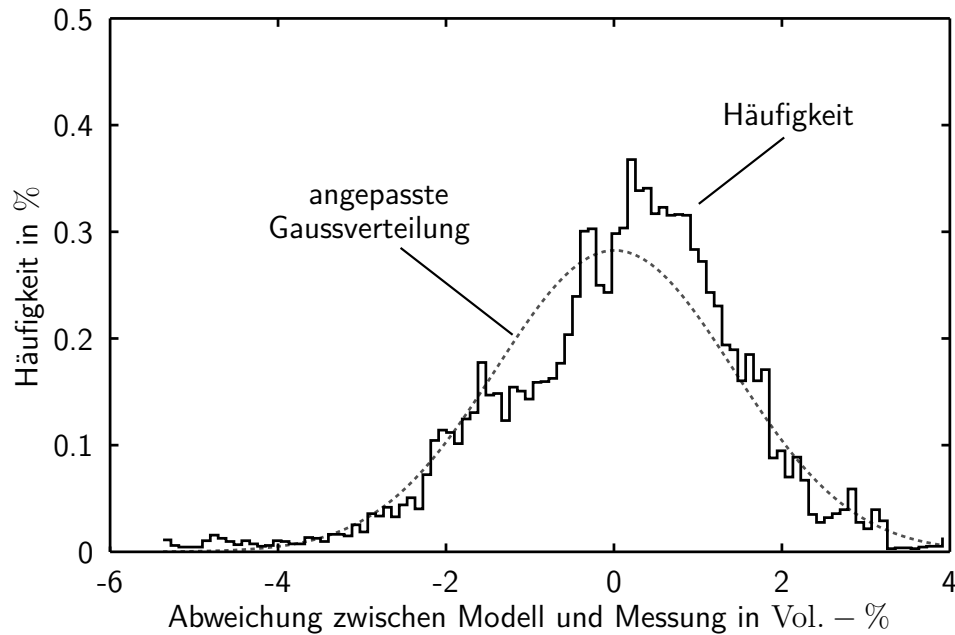


Bild 4.3: Statistische Verteilung der stochastischen Schwankungen des Sauerstoffes (deterministischer Teil des dynamisches Modells zuvor abgezogen). Die Abbildung verdeutlicht, dass die Annahme, dass es sich um gaußverteiltes Rauschen handelt, durchaus gerechtfertigt ist.

mit $k = 0, 1, \dots, N - 1$. Insbesondere ist der Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Frequenz f und k hervorzuheben. Über die Gleichung

$$f = \frac{k f_s}{N} \quad (4.2)$$

lässt sich k mittels der Samplingfrequenz f_s zu f überführen. Aus der berechneten DFT (eng.: *discrete forier transformation*) lässt sich nun sehr einfach das Amplitudenspektrum

$$A_k = |X_k| \quad (4.3)$$

ableiten. Um ferner die übliche Darstellung als einseitiges Amplitudenspektrum zu erhalten, wird das zuvor errechnete Amplitudenspektrum, wie in Gleichung 4.4 gezeigt, einfach verdoppelt.

$$\hat{A}_k = \begin{cases} |X_0| & k = 0 \\ 2 |X_k| & k \neq 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Gemäß der Definition ist das Leistungsspektrum P_k nichts anderes als die Einträge des Amplitudenspektrums quadriert und ergibt sich somit zu:

$$P_k = |X_k|^2. \quad (4.5)$$

Schließlich lässt sich auch das Phasenspektrum mit

$$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Imag}(X_k)}{\text{Real}(X_k)} \right) \quad (4.6)$$

berechnen. Aus dem Amplitudenspektrum oder dem Leistungsspektrum ist es nun möglich ein Rauschen zu erzeugen, welches dem der ursprünglichen Messung ähnelt. So sollen beispielsweise Frequenzen, die in Messungen stark vorhanden sind auch im simulierten Rauschsignal stark vertreten sein. Um das zu erreichen, wird von der ursprünglichen Messreihe das spektrale Leistungsspektrum beibehalten

$$A_k^{neu} = A_k \quad (4.7)$$

und das Phasenspektrum jedoch durch ein gleichverteiltes Rauschen ersetzt.

$$\varphi_k^{neu} = \mathcal{U}(-\pi, \pi). \quad (4.8)$$

Die Zusammensetzung des „neuen“ Rauschens X_k^{neu} = erfolgt nun trivialerweise durch

$$X_k^{neu} = A_k^{neu} \cdot e^{-i \cdot \varphi_k^{neu}} \quad (4.9)$$

und durch inverse Fouriertransformation wird eine neue Zeitreihe erzeugt, welche ähnliche stochastische Eigenschaften aufweist. Diese generierten Rauschdaten können dann für realitätsnahe Simulationen eingesetzt werden, indem sie den simulierten und deterministischen Daten addiert werden. Die Abbildungen 4.4–4.6 verdeutlichen die bisher stark theoretischen Erklärungen. Im vorliegenden Fall interessiert die Simulation des Sauerstoffgehaltes, beziehungsweise genauer formuliert die stochastischen Anteile der O₂-Konzentration. Das spektrale Amplitudenspektrum aus Gleichung 4.5 wird in Abbildung 4.4 dargestellt. Besonders auffällig ist die kleine Spitze im Bereich von 0,3 Hz, welche hervorgerufen wird durch die Periodizität des Schneckenantriebs zur Pelletförderung. Auch ersichtlich wird, dass die entscheidenden Störungen (> -10 dB) sich alle im Bereich von 0.01 Hz bewegen. Mit anderen Worten: Störungen die in weniger als 100 Sekunden auftreten sind vernachlässigbar klein. Das nun berechnete Amplitudenspektrum wird dann mit zufälligen Phasen gemäß Gleichung 4.9 zusammengesetzt und bildet das neue stochastische Signal, das zur Simulation verwendet werden kann. Abbildung 4.6 illustriert eine originale Sauerstoffmessung und zwei (A und B) zufällige Realisierungen.

Neben dem Rauschen des Sauerstoffsignals, ist auch das CO-Signal verrauscht und entspricht nicht exakt dem durch die CO- λ -Charakteristik prädizierten Wert. Als Problem stellte sich heraus, dass eine konstante additive Beschreibung des CO-Rauschen unzureichend ist. Das Rauschen der Konzentration weist für verschiedene O₂-Verhalten, sehr unterschiedliche Charakteristika auf. Abbildung 4.7 zeigt dieses Verhalten am Beispiel

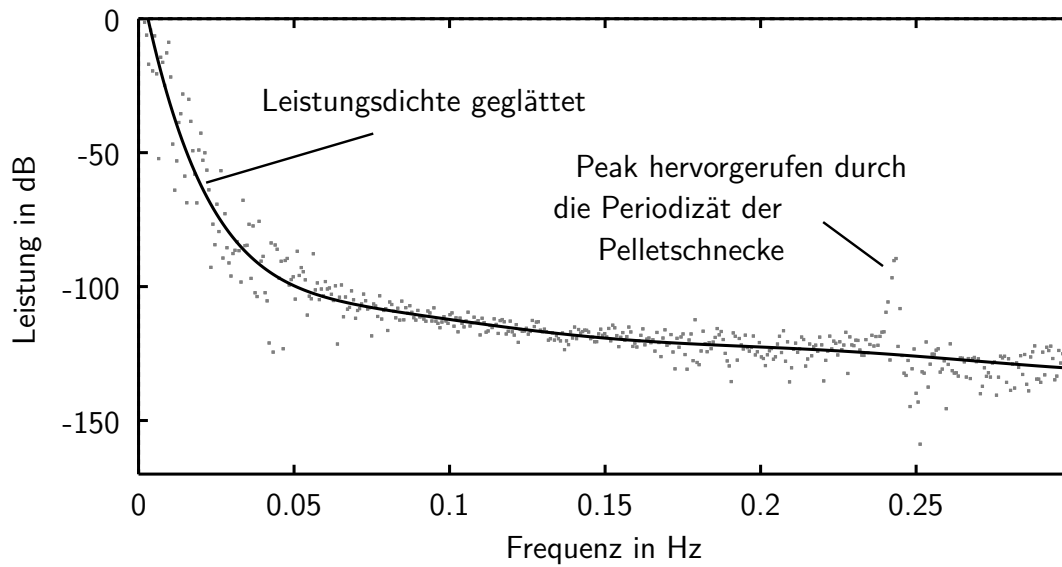


Bild 4.4: Spektrales Amplitudenspektrum der Sauerstoffkonzentration. Sehr deutlich zu Erkennen ist die Anregung der Schnecke bei einer Frequenz von 0,3 Hz. Außerdem wird deutlich, dass alle relevanten Schwankungen unter 0,01 Hz liegen.

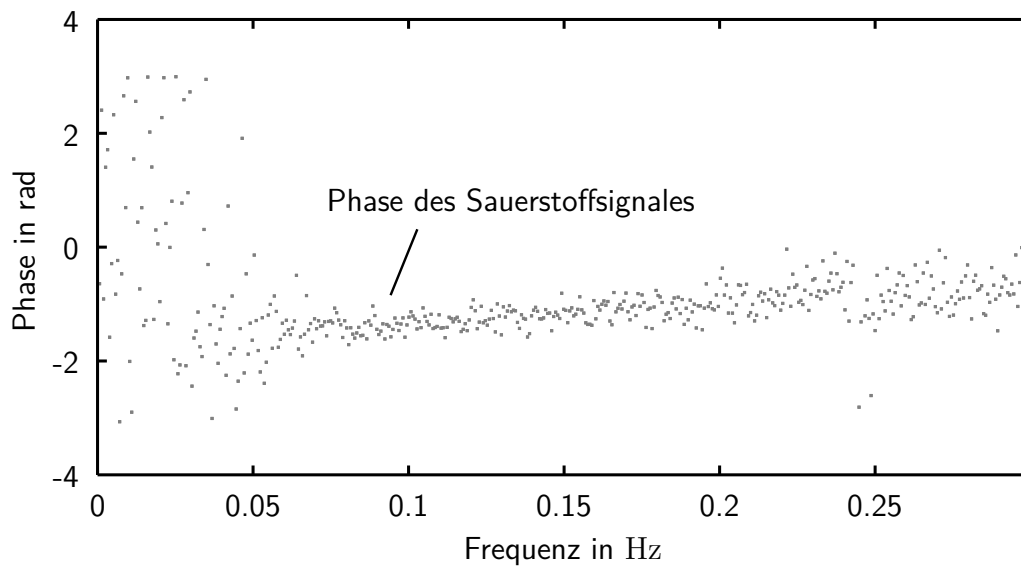


Bild 4.5: Phasendiagramm einer 4-stündigen Sauerstoffmessung.

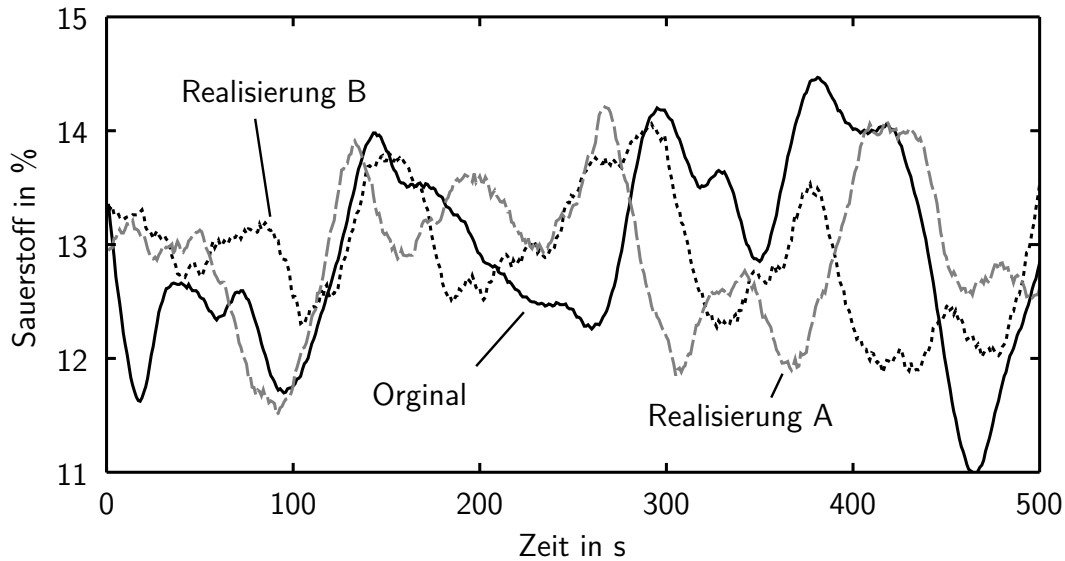


Bild 4.6: Beispiel für den Rauschgenerator. „Original“ bezeichnet die Messung von Sauerstoffschwankungen. In Grautönen und gestrichelt sind mehrere Realisierungen dargestellt, welche (zumindest optisch) ähnlich stochastische Eigenschaften aufweisen.

der 30 kW-Hackschnitzanlage. Zu sehen ist die Abweichung der Messwerte von einer zuvor bestimmten CO-O₂-Charakteristik für drei verschiedene Sauerstoffkonzentrationen. Zudem ist der beste Fit einer Gaußlocke (grau gestrichelt) eingezeichnet. Die Verteilungsfunktion ist in Bereichen geringer Sauerstoffkonzentration deutlich flacher als für höhere Luftzahlen. Physikalisch bedeutet dies, dass die CO-Emissionen in Bereichen geringer O₂-Konzentration sehr viel stärker schwanken (zumindest absolut gesehen), als im Fall hoher Konzentrationen. Bei 7 Vol. – % und 9 Vol. – % O₂ werden die Abweichungen vom Modell zunehmend geringer und die Gaußlocke damit steiler. Die abgeschnittene linke Flanke ergibt sich aus der Tatsache, dass die CO-Emissionen nie unter 0 mg m⁻³ sinken. Die Abbildung verdeutlicht ein zentrales Problem. Das Rauschverhalten ist stark vom aktuellen Systemzustand (hier: von der Sauerstoffkonzentration) abhängig. Hier lassen sich strukturell einfache Filteralgorithmen nur sehr schwierig einstellen, denn „Rauschen“ ohne Kenntnis der stochastischen Eigenschaften stellt eine nicht triviale Aufgabe dar. Ohne zu weit vorweg greifen zu wollen, wird später illustriert, dass ein Kalmanfilter diese Problematik auflöst, indem er die Kovarianz des stochastischen Signals in Echtzeit mitschätzt. Für die Simulationsplattform wurden verschiedene Rauschverhalten implementiert und für verschiedene Sauerstoffkonzentrationen interpoliert.

Abbildung 4.8 verdeutlicht in einem Strukturdiagramm das Gesamtsystem und die zuvor beschriebenen Komponenten. Das Modell der Kleinf Feuerungsanlage wird identifiziert durch Daten einer durch APRBS angeregten Messung. Durch das Modell kann das deterministische Systemverhalten simuliert werden. Der Rauschgenerator fügt realitätsnahe stochastische Störungen $c_{O_2, stoch}$ zum Sauerstoff $c_{O_2, sim}$ hinzu und das Signal wird durch

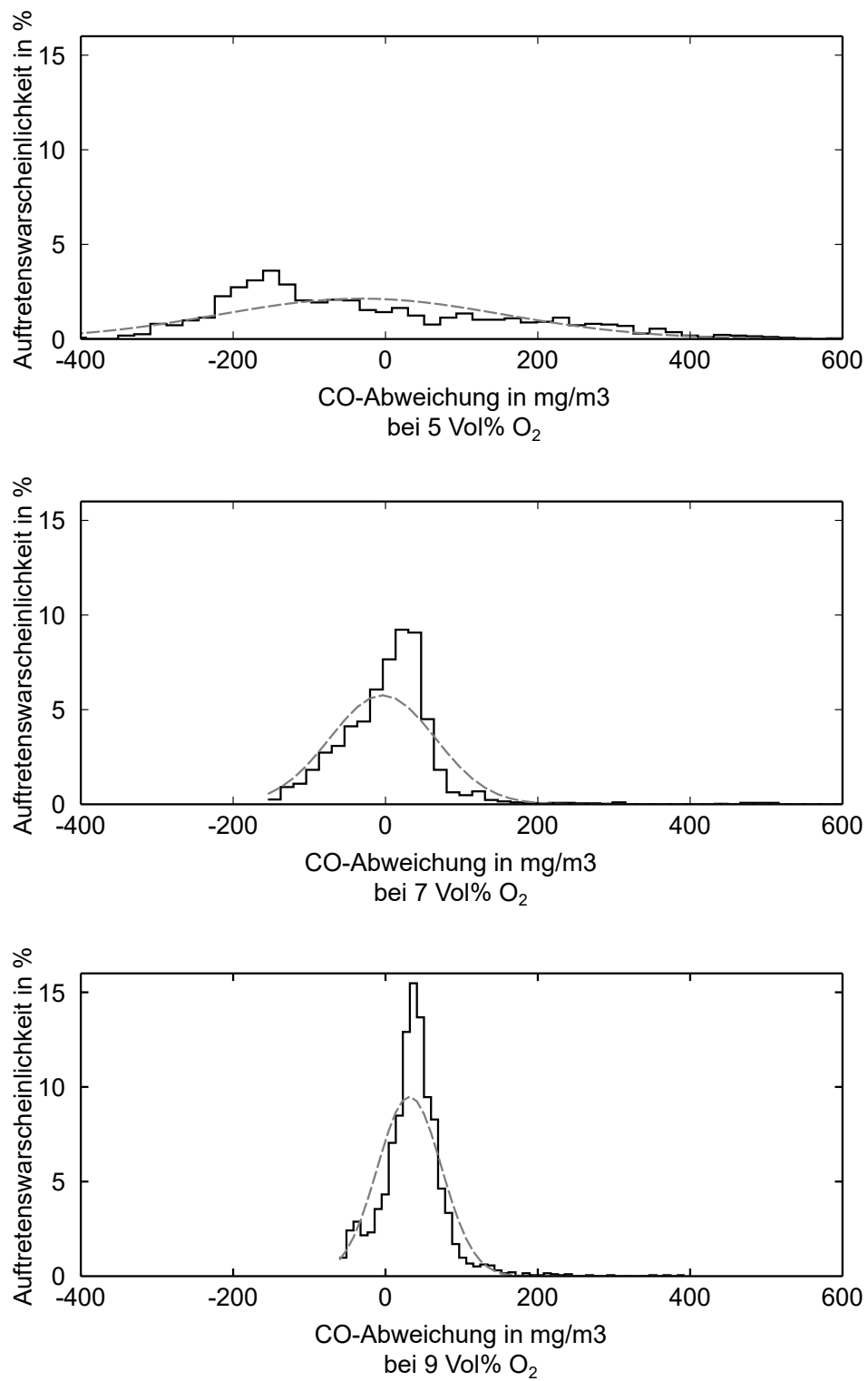


Bild 4.7: Rauschen des CO-Signals für verschiedene Sauerstoffkonzentrationen (Angabe der Abweichungen in Prozent). Bei geringeren Sauerstoffkonzentrationen weichen die CO-Emissionen stärker von der modellierten CO- λ -Charakteristik ab.

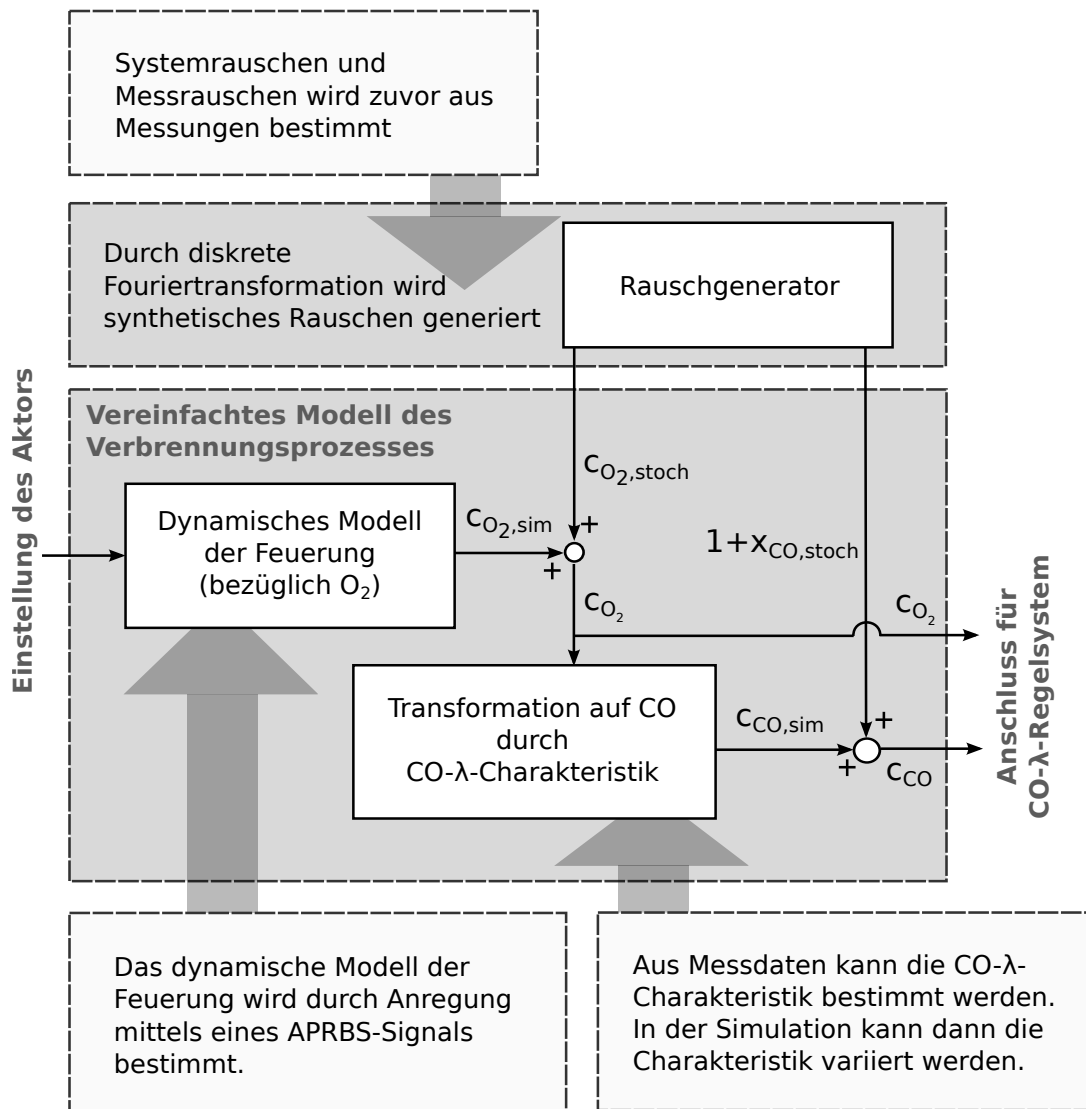


Bild 4.8: Strukturdiagramm der Simulationsplattform.

eine CO-Charakteristik zu einer CO-Konzentration $c_{CO, sim}$ transformiert. Additiv kommt das Messrauschen $c_{CO, stoch}$ hinzu. Die simulative Behandlung des Problems ermöglichte innerhalb sehr kurzer Zeit, verschiedenste Regelkonzepte aus der Literatur zu testen und miteinander zu vergleichen. Eine so schnelle und vor allem umfassende Überprüfung wäre an einer Feuerungsanlage bereits aus zeitlichen Gründen nicht möglich gewesen. Künstliche Veränderungen der CO- λ -Charakteristik konnten implementiert und die Auswirkungen des *signal-to-noise*-Verhältnisses sehr einfach analysiert werden. Auch in den späteren Phasen, wenn die Parametrisierung des Regelkonzeptes von Bedeutung war, verkürzte die Simulationsplattform die Entwicklungs- und Optimierungsdauer deutlich. Zusammenfassend wird für die Auslegung von komplexen Regelsystemen für Biomassekleinfeuerungsanlagen eine entsprechende Simulationsumgebung empfohlen. Auf eine detaillierte Beschreibung der Vorvalidierung der Reglerkonzepte wird verzichtet und in den folgenden Kapiteln direkt auf die Validierung an der realen Anlage eingegangen. Soll ein besonderes Augenmerk

4.4 Optimaler Arbeitspunkt der Verbrennungsregelung

Im idealen Fall sollte eine Regelung den feuerungstechnischen Wirkungsgrad maximieren und gleichzeitig die entstehenden Emissionen minimieren. Diese beiden Ziele sind jedoch oftmals nicht hundertprozentig miteinander vereinbar. Typischerweise liegt das Maximum des Wirkungsgrades bei geringfügig kleineren Sauerstoffkonzentrationen als das Minimum der Emissionen. Außerdem weisen viele Kleinfeuerungsanlagen sehr flache Charakteristiken auf, was die Bestimmung des Emissionsminimums erschwert. Stochastische Störungen können dann die bestimmte Position des Minimums (vor allem bei kurzen Messreihen) stark beeinflussen. Dies stellt eine zentrale Herausforderung für die meisten CO-Regelsysteme dar, da das *signal-to-noise*-Verhältnis im Bereich des Optimums oftmals sehr gering ist und sich daher stochastische Schwankungen nur sehr schwer von tatsächlichen Erhöhungen der CO-Emissionen unterscheiden lassen.

Angenommen die Charakteristik sei als Funktion $f(c_{\text{O}_2})$ gegeben, so kann ein emissionsoptimaler Sollwert für den Sauerstoffregler einfach berechnet werden. Am naheliegendsten ist aus der Funktion f durch einfaches Differenzieren und Nullsetzen die optimale Sauerstoffkonzentration zu berechnen. Oder mathematisch ausgedrückt:

$$\frac{\delta f(c_{\text{O}_2})}{\delta c_{\text{O}_2}} \stackrel{!}{=} 0. \quad (4.10)$$

Ebenfalls möglich ist es die Anlage mit einer höheren CO-Konzentration zu betreiben (z.B. bei 80 % des gesetzlichen Grenzwertes), um zusätzliche Wirkungsgraderhöhungen oder auch tiefere NO_x -Emissionen zu erzielen. Hierfür wird die Funktion mit der gewünschten CO-Konzentration gleichgesetzt und nach der Sauerstoffkonzentration aufgelöst. Da eine CO-Konzentration durch zwei verschiedene Sauerstoffkonzentrationen erreicht werden kann, muss eine der beiden gewählt werden. Typischerweise wird die geringere der beiden Sauerstoffkonzentration gewählt, da wir hier einen höheren Wirkungsgrad erreichen. Mathematisch ausgedrückt entspräche dies:

$$\min_{c_{\text{O}_2}} \left(f(c_{\text{O}_2}) \stackrel{!}{=} 0.8 \cdot c_{\text{CO,Grenzwert}} \right). \quad (4.11)$$

Programmiertechnisch sollte zusätzlich der Sonderfall beachtet werden, dass auf Grund einer schlechten Schätzung der Parabel, keine Lösung der Gleichung 4.11 gefunden werden kann.

Wie bereits betont sind viele der Charakteristiken in weiten Bereichen der Luftzahl flach. Eine Lösung für diese Problematik, stellt die Möglichkeit dar, die Anlage bei einer bestimmten Steigung der CO- λ -Charakteristik zu betreiben. Also in einem Bereich bei welchem wir die Feuerungsanlage zwar nicht exakt im Minimum betreiben, sondern, um eine ausreichende Korrelation zwischen Sauerstoff und CO zu erhalten, im (zu geringen)

Sauerstoffbereich. Nebenbei, wird hierbei ein Kompromiss zwischen Wirkungsgradsteigerungen und Emissionsminderungen gewählt. Man entscheidet hierzu vorab, welche Emissionssteigerung Δc_{CO} mit einer einprozentigen Steigerung des Wirkungsgrads zu rechtfertigen ist. Mit der Faustformel, dass jede Reduktion des Sauerstoffgehaltes um 1 Vol. – % ungefähr eine Wirkungsgradsteigerung von 1 %, hervorruft, kann man dies übersetzen in eine Steigung der CO-O₂-Charakteristik. Bestimmt man nun die Stelle der geschätzten CO-O₂-Charakteristik, welche diese Steigung aufweist, kann man mittels

$$\frac{\delta f(c_{O_2})}{\delta c_{O_2}} = \frac{\Delta c_{CO}}{1} \rightarrow c_{O_2,opt} \quad (4.12)$$

die optimale Sauerstoffkonzentration berechnen.

Eine weitere Möglichkeit ist die Einführung eines Straffaktors. Hierbei wird ein Straffaktor für die O₂-Konzentrationen zur CO-Konzentration c_{CO} addiert. Vorteil dieser Methode ist, dass sie bereits vor der Schätzung der Charakteristik wirkt. Das Aufaddieren des Straffaktors „hebt“ den rechten Ast der CO-O₂-Charakteristik und verbessert damit für viele Anlagen die Schätzung der Charakteristik. Die CO-Konzentration c_{CO} setzt sich dann folgendermaßen zusammen:

$$c_{CO} = c_{CO,gemessen} + c_{O_2} \cdot \frac{\Delta c_{CO}}{1}. \quad (4.13)$$

Diese zuletzt beschriebene Variante wurde für die CO- λ -Regelung der folgenden Kapitel verwendet. Da bei reinen CO-Regelung nicht auf die CO-O₂-Charakteristik zurückgegriffen wird, sondern auf die CO-m-Charakteristik, kann man den Straffaktor bei reinen CO-Regelungen auf den Luftmassenstrom m beziehen:

$$c_{CO} = c_{CO,gemessen} + m \cdot \frac{\Delta c_{CO}}{1}. \quad (4.14)$$

Abbildung 4.9 zeigt wie sich verschiedene Werte für Δc_{CO} auf die Charakteristik auswirken.

Anzumerken ist hierbei, dass sich das Minimum geringfügig verschiebt durch den additiven Term, dieser kann entweder (wie in dieser Arbeit) vernachlässigt werden oder beim Setzen des Sollwertes entsprechend korrigiert werden.

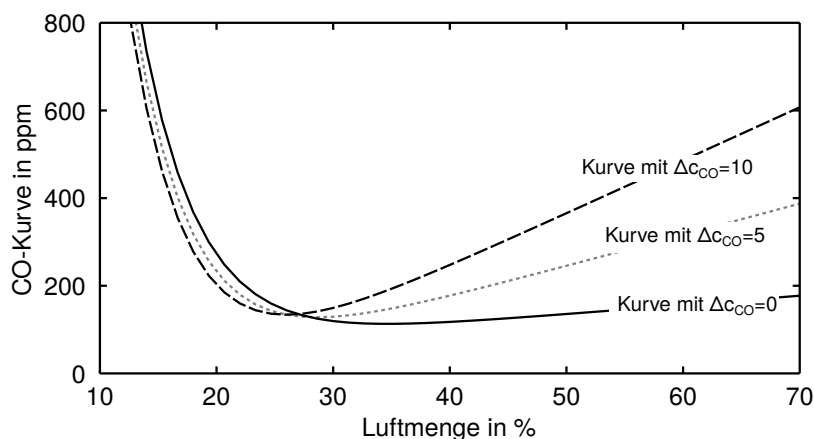


Bild 4.9: Die CO-m-Charakteristik eines Pelletofens für verschiedene Faktoren Δc_{CO} . Die Luftmenge ist in Prozent bezüglich auf die maximale Luftmenge angegeben. Die Abbildung lässt sich gedanklich natürlich leicht auf CO-O₂-Charakteristiken übertragen.

4.5 Vorteile der CO-O₂-Regelung im Vergleich zur reinen sauerstoffbasierten Regelungen

Durch die zusätzliche Messung der Kohlenmonoxidkonzentration bei der CO-O₂-Regelung ergeben sich einige auf der Hand liegende Vorteile im Vergleich zur klassischen sauerstoffbasierten Regelung.

Geringerer Aufwand zur Einstellung der Anlage: Feuerungen mit CO-O₂-Regelung erfordern keine manuelle Optimierung der Luftzahl. Dies erleichtert zum einen den Engineeringprozess der Feuerung selbst, führt aber auch dazu, dass die Anlage am Ort der Installation nicht weiter optimiert werden muss.

Fähigkeit die Emissionen zu minimieren: CO-O₂-Regelungen garantieren eine emissionsoptimale Einstellung der Luftzahl.

Unabhängigkeit von der Qualität der Sauerstoffmessung: Das CO-O₂-Regelungskonzept lässt eine deutlich schlechtere Sauerstoffmessung zu und der Absolutbetrag der Sauerstoffkonzentration wird unbedeutend. Hierdurch ist eine deutliche Reduktion der Wartungsintensivität der Lambdasonden zu erwarten.

Unabhängigkeit von der Brennstofffeuchte: Insbesondere bei Hackschnitzeln treten im Allgemeinen große Variationen der Brennstofffeuchte auf. Sollen optimale Verbrennungsbedingungen herrschen, müsste die (feuchte) Luftzahl bei reinen sauerstoffbasierten Regelkonzepten an die Brennstofffeuchte angepasst werden. Dies ist in der Praxis in den seltensten Fällen möglich, stattdessen wird die Anlage meist unter suboptimalen Sauerstoffkonzentrationen betrieben. Hinzu kommt natürlich, dass sich

die Charakteristik an sich natürlich ebenfalls nur Variation der Brennstofffeuchte verändert.

Direkte Einschätzung der Verbrennungsqualität möglich: Zusätzliche Sicherheitsmechanismen lassen sich durch die kontinuierliche Messung der CO-Konzentration realisieren. Der Betreiber kann so über Probleme während des Verbrennungsprozesses informiert werden.

4.6 Vorteile der CO-O₂-Regelung im Vergleich zur reinen CO-Regelungen

CO- λ -Regelsysteme weisen grundsätzlich einige positive Eigenschaften im Vergleich zur reinen CO-Reglern auf:

Schärfere Charakteristik: Da im Gegensatz zum reinen CO-Regler, auch der Sauerstoffgehalt zur Verfügung steht, muss nicht auf die Charakteristik zwischen zugeführter Luft und Kohlenmonoxidkonzentration (CO-m-Charakteristik) zurückgegriffen werden, sondern es kann direkt die CO- λ -Charakteristik (beziehungsweise genauer gesagt die CO-O₂-Charakteristik) geschätzt werden. Diese weist einen deutlich geringeren Rauschanteil auf und unterliegt geringeren Schwankungen als die, beim reinen CO-Regler verwendete, CO-m-Charakteristik. Hauptgrund hierfür ist die Tatsache, dass temporäre Leistungsschwankungen durch unregelmäßige Vergasung sich im Sauerstoffgehalt zeigen, jedoch nahezu keinen Einfluss auf die eingehenden Luftmassenströme haben.

Keine relevante Dynamik: Während beim CO-Regler am Pelletofen die Dynamik des Prozesses von großer Bedeutung war, besteht zwischen der Sauerstoff- und der Kohlenmonoxidkonzentration nahezu kein dynamisches Verhalten. Zwischen dem CO- und dem O₂-Signal besteht meist kein zeitlicher Offset oder dieser ist so gering (<2 s), dass auf eine Kompensation der Dynamik verzichtet werden kann.

Kompensation der Sauerstoffquerempfindlichkeit: Durch die gleichzeitige Messung von Sauerstoff und CO kann die Sauerstoffquerempfindlichkeit des CO-Sensors kompensiert werden. Alle momentan preiswert erhältlichen CO-Sensoren weisen eine mehr oder weniger starke Sauerstoffquerempfindlichkeit auf und eine Kompensation kann zu deutlichen Verbesserungen der Messgenauigkeit führen. Unter typischen Betriebsbedingungen sind Abweichungen von 10 %-50 % des Absolutwertes auf Grund der Sauerstoffquerempfindlichkeit zu erwarten¹. Des Weiteren kann die

¹ Die Sauerstoffquerempfindlichkeit ist natürlich stark abhängig von Messprinzip und Hersteller.

CO-Konzentration, durch Messung der Sauerstoffkonzentration, auf eine gewünschte Konzentration normiert werden und entspricht daher auch den tatsächlich auftretenden Emissionen.

Prozessstabilität: Während der CO-m-Regler auf Grund seiner Trägheit den Verbrennungsprozess nicht stabilisiert, kann bei der CO- λ -Regelung das Sauerstoffsignal dafür verwendet werden, um beispielsweise Brennstoffabbauschwankungen auszugleichen. Bei Anlagen, wie dem vorgestellten Pelletofen, spielt dieser Vorteil eine untergeordnete Rolle, da die Verbrennung selbst durch die gleichmäßige Pelletzufuhr bereits ausreichend stationär ist. Eine Stabilisierung durch eine Sauerstoffregelung ist für einen Pelletofen daher weniger von Bedeutung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die CO- λ -Regelung einige klare Vorteile mit sich bringt (vgl. [16]) und es ist für die einzelne Anlage abzuwägen, ob diese Vorteile den wirtschaftlichen Mehraufwand rechtfertigen.

4.7 Vergleich verschiedener Ansätze zur CO-O₂-Regelung

Dieses Kapitel fasst bisherige Konzepte und eigene Ideen zusammen. Die Konzepte werden in drei Kategorien unterteilt: *gradientenbasierte Konzepte*, *datenbasierten Systeme* und *Konzepte basierend auf der Echtzeitschätzung der Charakteristik* und zeigt die Vorteile und Nachteile der Varianten auf. Die Konzepte lassen sich nicht eindeutig voneinander abgrenzen und es sind diverse Mischformen möglich.

4.7.1 Gradientenbasierte Ansätze

Die meisten der in der Literatur vorgeschlagenen Konzepte zur CO- λ -Regelung, basieren auf der Idee der lokalen Gradientenschätzung. Abbildung 4.10 illustriert dieses Konzept. Die Sauerstoffkonzentration, sowie die Kohlenmonoxidkonzentration werden gefiltert um Rauschen zu reduzieren. Dies geschieht im einfachsten Fall durch Mittelwertbildung über ein geeignetes Messintervall (z.B. $\Delta t = 10$ min). Im nächsten Schritt werden die gemittelten Emissionen mit einer oder mehreren vorherigen Messungen verglichen. Im einfachsten Fall werden beispielsweise die Emissionen vom Zeitpunkt t bis $t - \Delta t$ mit den Emissionen $t - \Delta t$ bis $t - 2\Delta t$ verglichen. Im Anschluss wird die Sauerstoffkonzentration für die Messung von Zeitpunkt t bis $t + \Delta t$ in Richtung geringerer Emissionen eingestellt. Die Filterung bzw. Mittelung von O₂ und CO sorgt dafür, dass lange Zeitintervalle zum Auffinden des Optimums notwendig sind. Die Folge ist, dass die Anlage über relativ lange Zeitintervalle unter verbrennungstechnisch suboptimalen Einstellungen betrieben wird. Werden hingegen die Mittelungsintervalle verkleinert, sorgen die stochastischen Schwankungen der O₂- und CO-Konzentration dafür, dass die lokale Gradientenschätzung

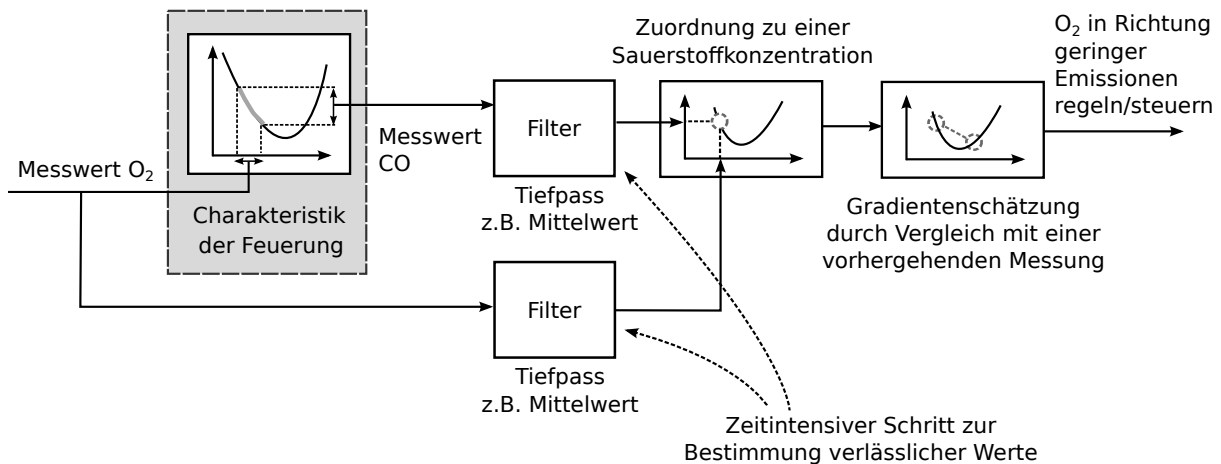


Bild 4.10: Grundsätzliche Funktionsweise bisheriger Ansätze zur CO- λ -Regelung.

unzuverlässig wird und die optimale Sauerstoffkonzentration nicht erreicht wird. Hinzu kommt, dass diese Regelkonzepte selbst im Idealfall mindestens eine Zeitspanne Δt benötigen, um verbrennungstechnisch ungünstige Bedingungen zu ändern. Die bisherigen Arbeiten mit gradientenbasierten Verfahren weisen die grundsätzliche Funktionsweise auf.

Ein weiteres potentiell Konzept, welches ebenfalls auf der Schätzung eines lokalen Gradienten basiert und sich im Besonderen in der chemischen Industrie heutzutage großer Beliebtheit erfreut, ist die sogenannte Echtzeitoptimierung (engl.: *real-time optimization* (RTO)). Die Fähigkeit, ohne Modellierungsaufwand, eine Anlage in optimale Arbeitspunkte zu fahren, ist einer der entscheidenden Argumente, Realtime-Optimierungen den klassischen *Offline*-Optimierungen vorzuziehen. Für das Forschungsgebiet „Verbrennung von Biomasse“ ist die Modellierung noch immer eine der großen Herausforderungen. Die Modellierung der Biomasseverbrennung ist noch immer Gegenstand der Forschung und erreicht heutzutage bei weitem nicht die Aussagekraft, wie für andere Festbrennstoffe (z.B. Kohle) oder gasförmiger Brennstoffe wie Erdgas. Online-Optimierungen – im Folgenden als Echtzeit- oder Realtime-Optimierungen (RTO) bezeichnet – können hierbei einen Beitrag leisten. Denn bei einem Großteil dieser Methoden wird kein analytisches Modell des Prozesses benötigt oder die Methoden sind in der Lage große Modellierungsungenauigkeiten und -fehler zu kompensieren. RTO's optimieren den dynamischen Prozess in Echtzeit durch Variation der Eingänge und überführen den Prozess in den optimalen Zustand – im Falle von Verbrennung meist den Zustand der minimalen Emissionen oder maximaler Wirkungsgrade. Da gerade die Biomasseverbrennung ein Prozess mit einer hohen Anzahl an Störgrößen (z.B. Feuchte, Heizwert, Schüttdichte) ist und sich diese fortwährend ändern können, kann der optimale Zustand durchaus zeitvariant sein. Die Optimierung sollte daher fortwährend oder zumindest in festen Zeitintervallen durchgeführt werden. Daraus ergibt sich die Forderung, dass die Optimierung schneller gelöst wird, als die Geschwindigkeit mit der sich der Prozess ändert. Wie Abbildung 4.11 verdeutlicht, muss eine Echtzeitoptimierung schneller sein als die dominierenden Dynamiken, welche die

Schadstoffcharakteristik beeinflussen (beispielsweise eine Änderung der Leistung oder des Brennstofffeuchte) jedoch langsamer als die stochastische Anregung und die Dynamiken der Unterregelkreise. Besonders herausfordernd wird eine Echtzeitoptimierung, wenn sich die einzelnen Bereiche überschneiden und sich nicht klar voneinander abgrenzen lassen. Echtzeitoptimierung ist immer dann besonders erfolgsversprechend, wenn die Trennung der Dynamiken (engl. Fachbegriff: *time separation*) möglich ist.

Biomassefeuerungsanlagen weisen in einem sehr breiten Frequenzband stochastische Störungen auf. Dies erschwert *time separation* erheblich und führt dazu, dass lange Mittelungs- oder Schätzintervalle notwendig sind, um vertrauenswürdige Mittelwerte für das Gütekriterium (typischerweise die Kohlenmonoxidkonzentration) zu erhalten. In den bisherigen Arbeiten im Themengebiet CO-Regelung sind durchgehend Mittelungsintervalle von 8 min bis 15 min empfohlen. Selbst wenn nun davon ausgegangen wird, dass nur 2-4 Schritte zum Auffinden des optimalen Arbeitspunktes benötigt werden, sind 20-60 min für eine vollständige Optimierung notwendig. Dies widerspricht der typischen Anwendung von Kleinf Feuerungsanlagen, die in der Praxis oft nur wenige Stunden oder Minuten am Stück betrieben werden oder innerhalb des Betriebs fortwährend ihre Leistung anpassen. Die

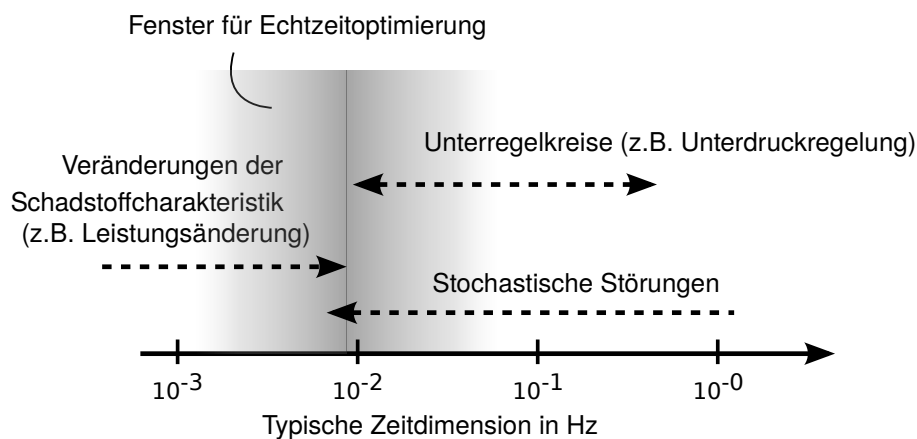


Bild 4.11: Die relevanten Frequenzbereiche einer Kleinf Feuerungsanlage. Gekennzeichnet sind die Bereiche stochastischen Störungen, Unterregelkreise (z.B. Lambdaregelung) und Änderungen der Schadstoffcharakteristik.

Auswahl der geeigneten Optimierungsstrategie ist stark von der Struktur oder Form des Minimums, der Stärke der Störgrößen, der Art der Beschränkungen (Nebenbedingungen) und natürlich der Dimensionalität des Problems abhängig. Wie wir in den späteren Kapiteln sehen werden, stellen für die Regelung und Optimierung von Kleinf Feuerungsanlagen eher die Form der Charakteristik, sowie die starken Störungen, weniger die Dimensionalität¹ die Herausforderung bei der richtigen RTO-Methode fest. Eine der am häufigsten eingesetzten RTO-Methoden ist das sogenannte *Extremum Seeking Control (ESC)*. Vier Typen von

¹ Es handelt sich in praktisch allen Fällen um ein- oder zweidimensionale Optimierungen, meist nur Sekundärluft.

Extremum Seeking Control sind hierbei in der Literatur häufig zu finden. Zu nennen sind *Perturbation based ESC*, *Sliding mode ESC* sowie den *Approximation based ESC* und *Adaptive ESC*. Auf eine detaillierte Darstellung der Unterschiede dieser ESC-Algorithmen wird auf Grund der Übersichtlichkeit verzichtet und nur als Einführung die grundsätzliche Funktionsweise eines der wichtigsten Algorithmen – nämlich *Perturbation based ESC* – erläutert. Diese Klasse von Algorithmen kann mit Sicherheit als die populärste bezeichnet werden [70] und wird umfassend in der Literatur behandelt [71, 72, 73, 74, 75, 76, 77]. Übersichten über ESC-Algorithmen sind beispielsweise unter [78] zu finden. Die Idee basiert auf der Anregung des Systems durch ein periodisches Signal (üblicherweise durch Anregung eines Sinussignal).

$$x = \alpha \cdot \sin \omega_0 t + \hat{x}_{opt} \quad (4.15)$$

Mit der Amplitude α , der Frequenz ω , dem zu optimierenden Eingang x , sowie dem prädierten optimalen Zustand \hat{x}_{opt} . Der Ausgang y des Systems (am Beispiels von Feuerungen: die CO-Konzentration) wird hochpassgefiltert, (mit dem Filter $H\{\cdot\}$) um den Gleichanteil zu eliminieren. Anschließend wird das gefilterte Signal demoduliert durch das (bekannte) Eingangssignal.

$$\varepsilon = H\{y\} \cdot \sin \omega_0 t \quad (4.16)$$

Das erhaltene Signal ε dient als Schätzung des Gradienten der statischen Abbildung im Zustand x . Dieser Gradient wird integriert und dazu verwendet, den Zustand x in Richtung des Optimums zu verschieben (auch *adaption law* genannt).

$$\hat{x}_{opt} = -\varepsilon \frac{k}{s} \quad (4.17)$$

Hierbei ist k eine Konstante zur Anpassung der Konvergenzgeschwindigkeit. Zusätzlich sind teilweise Tiefpassfilter notwendig, um die Gradientenberechnung robuster gegen stochastische Schwankungen zu machen [70]. Abbildung 4.12 zeigt den dargestellten Algorithmus als Blockdiagramm. Um die Größen etwas anschaulicher zu machen, folgt in Abbildung 4.13 ein Beispiel, wie ein solcher Algorithmus für die CO- λ -Regelung aussehen könnte. Gesetztenfalls man möchte die Sollsauerstoffkonzentration $c_{O_2,s}$ unter Minimierung der CO-Emissionen optimieren, so wäre der Ausgang y die c_{CO} -Konzentration. Die c_{O_2} -Konzentration wäre in diesem Fall der zu optimierende Zustand x .

Insbesondere in der Anfangsphase dieser Arbeit wurde versucht diese Standard-ESC-Algorithmen zur Optimierung der CO-Konzentration zu verwenden. In Simulationen wurde jedoch festgestellt, dass sich zwei entscheidende Probleme ergeben. Erstens waren bei den pertubationsbasierten ESC's zwischen 10 bis 20 Schwingenspiele notwendig (vgl. mit einem

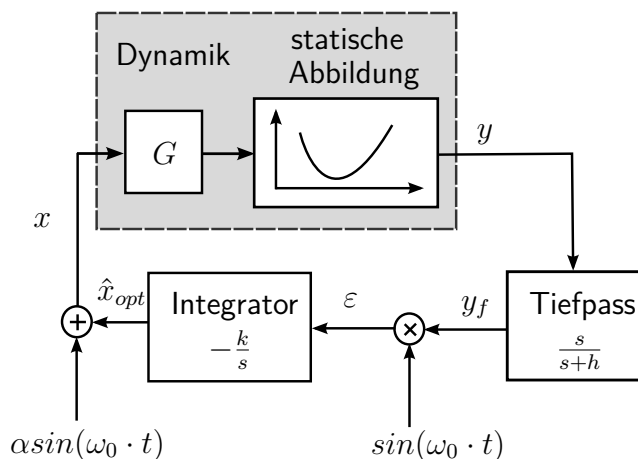


Bild 4.12: Einfacher Perturbationsbasierter Extremum-Seeking-Aufbau.

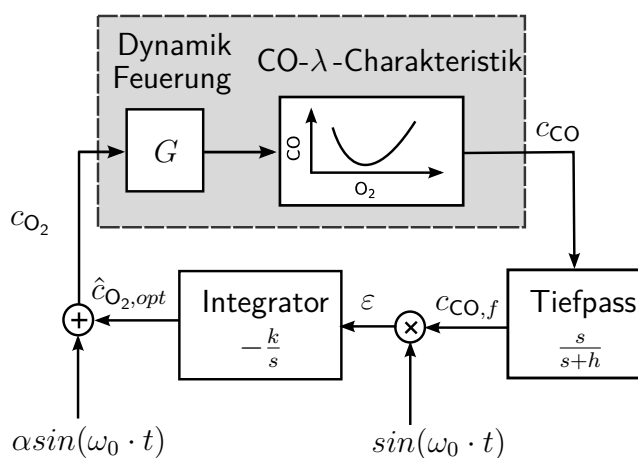


Bild 4.13: Perturbationsbasierter Extremum-Seeking-Aufbau als mögliches Konzept für die CO- λ -Regelung. Der Sauerstoffsollwert $c_{O_2,s}$ wird mit einem Sinussignal angeregt (wird hinzuaddiert) und die sich daraus ergebenden CO-Emissionen c_{CO} tiefpassgefiltert. Das resultierende Signal wird anschließend mit der aufgegebenen Sinusschwingung demoduliert. Über Integration des erhaltenen Signales verschiebt sich der Sollwert in Richtung der optimalen Sauerstoffkonzentration.

anderen Optimierungsproblem in [70]) um die Sauerstoffkonzentration zu optimieren. Zieht man dann in Betracht, dass die Sauerstoffregler oftmals nicht in der Lage sind Schwingungen mit Periodendauern von kleiner 4 min zu folgen, ergeben sich Optimierungsdauern von mindestens 40 min. Hinzu kommt, dass eine periodische Anregung der Sauerstoffkonzentration, alle anderen Regelkreise (z.B. Unterdruckregelung und Massenstromregelung) ebenfalls zum Schwingen anregt und damit die Verbrennung an sich unruhiger macht. Die sich daraus ergebende Folge ist, dass die Qualität der Gradientenschätzung stark reduziert wird. Der zweite Punkt, welcher die Nutzbarkeit klassischer ESC-Algorithmen limitiert, ist das stark stochastische Verhalten des Verbrennungsprozesses in Biomassefeuerungen. Selbst unter der Annahme, dass ein sehr gut ausgelegter Sauerstoffregler in

der Lage ist, einem Schwingspiel mit einer Periodendauer von 4 min zu folgen, so wäre es mit den in dieser Zeit gesammelten Daten nur eingeschränkt möglich einen verlässlichen Gradienten zu schätzen. Zusammenfassend ist die Anwendbarkeit klassischer ESC für Biomassefeuerungen kritisch zu sehen.

4.7.2 Datenbasierte Ansätze

Diese Ansätze verfolgen die Idee, über einen gewissen Zeitraum hinweg die Sauerstoff- und Kohlenmonoxidkonzentration des Verbrennungsprozesses zu speichern und dann mittels eines geeigneten Algorithmus auf die optimale Sauerstoffkonzentration zu schließen. Sie entsprechen in gewisser Weise dem empirischen Vorgehen, verschiedene Sauerstoffkonzentrationen „zu testen“ und darauf die optimale Einstellung zu schätzen.

Im Rahmen von reinen CO-Reglern - jedoch auch auf CO-O₂-Regler übertragbar - wurde in [79] ein weiterer daten-basierter Ansatz verfolgt. Grundidee des Konzept ist, aus den gesammelten CO-Konzentrationen und der zum jeweiligen Zeitpunkt zur Verfügung gestellten Luftmenge, auf die optimale Luftmenge zu schließen. Über ein rekursives Least-Square-Verfahren wurde eine Funktion an die gesammelten Daten gefittet. Ein zusätzlicher Vergessensfaktor sorgte dafür, dass zeitlich lange zurückliegende Daten weniger stark ins Gewicht fallen, als jüngst gesammelte Daten. Die grundsätzliche Funktionsweise wurde zwar nachgewiesen, jedoch sind eine Reihe von Nachteilen bestehen geblieben. Insbesondere die Notwendigkeit, dass ein relativ großer Bereich der Luftzahl „abgefahren“ werden muss, stellt ein Hindernis für den Einsatz in praktischen Anwendungen dar. Als Beispiel dieses Ansatzes ist das von Good [16] vorgeschlagene Konzept zu nennen, welches bereits im Stand der Technik diskutiert wurde. Idee war die CO-Konzentrationen über mehrere einzelne Sauerstoffkonzentrationen zu mitteln und anschließend das Intervall mit den geringsten mittleren Emissionen zu wählen. Wie bereits erwähnt, können hierbei mehrere lokale Minima auftreten.

Eine weitere Möglichkeit (welche lokale Minima verhindert) bestünde darin, eine stückweise lineare, konvexe Funktion an die gesammelten Konzentrationen (CO und O₂) zu fitten (z.B. mit der Methode von [80]). Hierbei könnte das Vorhandensein eines einzigen Minimums über die Konvexität garantiert werden. Ein gewichtiger Nachteil ist die Notwendigkeit in Echtzeit ein Optimierungsproblem lösen zu müssen. Dies setzt eine gewisse Rechenleistung voraus, welche für Kleinf Feuerungsanlage nicht garantiert werden kann.

4.7.3 Neues Konzept basierend auf der Echtzeitschätzung der Charakteristik

Die beiden bisher formulierten Ansätze weisen deutliche Defizite auf und schnitten weder in Simulation noch in der prototypischen Implementierungen an der realen Anlage gut ab. Diese Arbeit konzentriert sich auf ein Regelkonzept, welches die bisher formulierten

Nachteile überwindet. Grundidee ist die CO- λ -Charakteristik der Feuerung direkt zu schätzen und nicht, wie bisherige Ansätze, einen lokalen Gradienten oder einen Fit an zuvor gesammelte Daten. Abbildung 4.14 zeigt das neue Konzept schematisch in Form eines Blockschaltbildes. Wie illustriert, entfallen die beiden Filter, welche bei gradientenbasierten Methoden eingesetzt werden (vgl. Abb. 4.10) und die Charakteristik wird direkt aus den Messwerten geschätzt. Erst die sich daraus ergebende optimale Sauerstoffkonzentration wird tiefpassgefiltert und die Anlage auf die entsprechende Sauerstoffkonzentration eingestellt. Diese „Nachhintenverschiebung“ des glättenden Filters bewirkt eine deutliche Reduktion der Zeit, welche notwendig ist, um das Optimum zu bestimmen und erhöht gleichzeitig die Robustheit gegenüber stochastischen Ausreißern. Die eingesetzten Algorithmen werden nun in den folgenden Kapiteln detaillierter beschrieben.

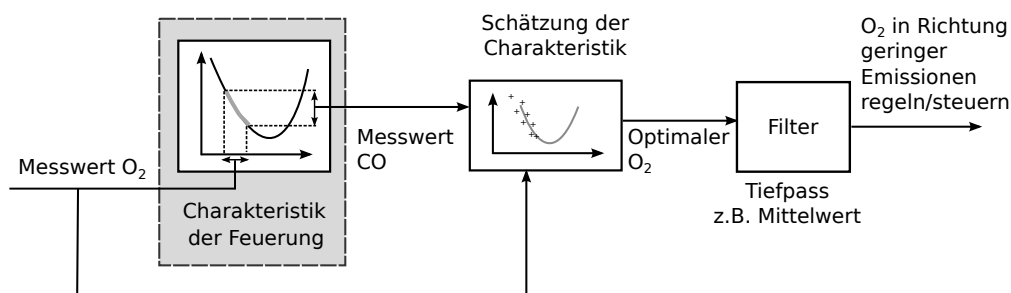


Bild 4.14: Schema des in dieser Arbeit verfolgten Ansatzes durch kontinuierliche Schätzung der CO- λ -Charakteristik.

4.8 Funktionsweise des CO-O₂-Reglers

In diesem Kapitel wird die Funktionsweise des neuen CO-O₂-Reglers detaillierter vorgestellt. Tabelle 4.1 liefert, neben der Nomenklatur am Anfang dieser Arbeit, aus Gründen der Übersicht eine Zusammenfassung der verwendeten Variablen und Abkürzungen. Mit Hilfe der Abbildung 4.15 wird die Funktionsweise des CO-O₂-Schätzers in Form eines Blockschaltbildes illustriert. Im Abgas wird die feuchte Sauerstoffkonzentration c_{O_2} durch die Lambdasonde bestimmt. Diese Sauerstoffkonzentration wird mit dem gewünschten Sauerstoffsollwert $c_{O_{2,s}}$ verglichen ①. Aus der gemessenen Sauerstoffkonzentration c_{O_2} und dem Sollwert $c_{O_{2,s}}$ wird die momentane Regelabweichung $e_{O_2} = c_{O_{2,s}} - c_{O_2}$ berechnet. Diese wird einem Sauerstoffregler – ob nun ein modellbasierter Ansatz oder ein einfacher PID-Regler, sei an dieser Stelle zu vernachlässigen – übergeben ②. Die Regelung berechnet anschließend, in Abhängigkeit des gewählten Reglers, die Stellgrößen u für die Feuerung, um die Regelabweichung zu reduzieren. Welche Stellgrößen verwendet werden, hängt hierbei ebenfalls vom verwendeten Regelkonzept ab. Bei den meisten Regelkonzepten (meist einfache PID-Regelungen) wird als Stellgröße die Leistung des Sekundärluftgebläses verwendet. Ist beispielsweise der Regelfehler e_{O_2} positiv, wird die

Tab. 4.1: Die wichtigsten Variablenbezeichnungen. Die ausführliche Nomenklatur ist im Glossar zu finden. Falls nicht explizit angegeben sind alle Größen ohne die Kennzeichnung „RGA“ feucht gemessen und bezogen auf 13 Vol. – % feuchten Sauerstoff.

Abkürzung	Erläuterung
c_{O_2}	mg m^{-3} w.b. Sauerstoffkonzentration (KS1D)
c_{CO}	mg m^{-3} w.b. 13 Vol. – % O_2 w.b. CO äquivalentes KS1D Sensorsignal
$c_{CO,RGA}$	mg m^{-3} d.b. 13 Vol. – % O_2 Kohlenmonoxidkonzentration (Rauchgasanalytik)
$c_{O_2,RGA}$	mg m^{-3} d.b. Sauerstoffkonzentration (Rauchgasanalytik)
w_{H_2O}	Brennstoffwassergehalt
x	– Parameter des CO- λ -Modells
k_i	– Parameter der COe Berechnung

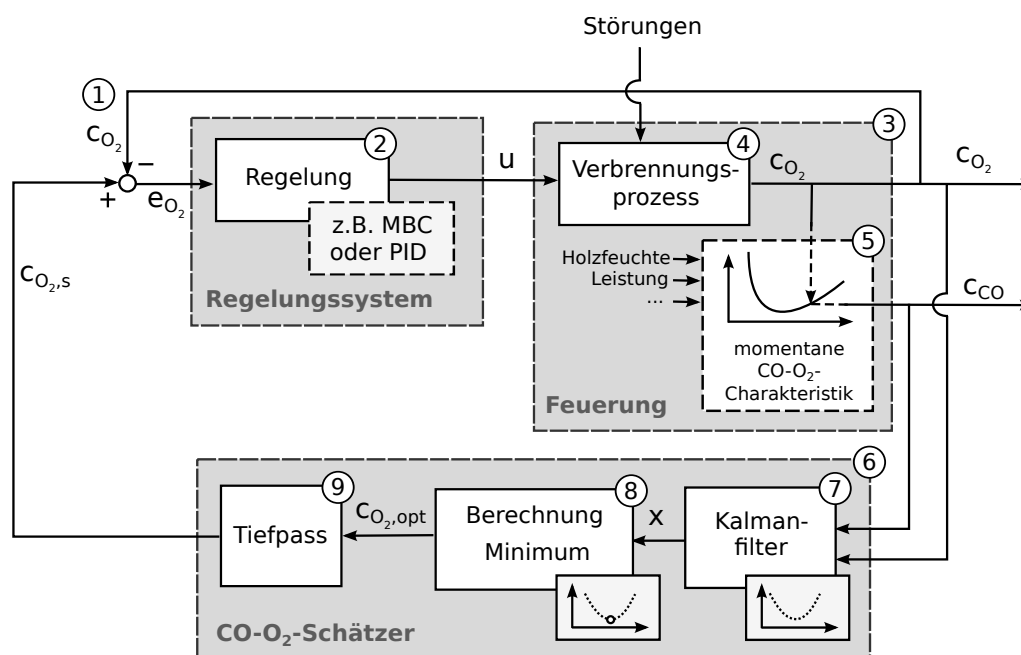


Bild 4.15: Blockschaltbildes des neuen Regelkonzeptes.

Sekundärgebläseleistung entsprechend erhöht, um die Sauerstoffkonzentration zu erhöhen und damit den Regelfehler zu reduzieren. Wie in Kapitel 2.4.1 und Abbildung 2.8 gezeigt wurde, sind hierbei Konfigurationen mit und ohne unterlagertem Massenstromregler möglich. Unter Verwendung eines Massenstromsensors werden zwei kaskadierte Regelkreise implementiert: ein unterlagerter, der den aktuellen Massenstrom regelt und als Stellgröße die Leistung des Sekundärgebläses verwendet, sowie ein zweiter Regelkreis, welcher die Sauerstoffkonzentration regelt und den Sollwert des Massenstromes als Stellgröße verwendet. Hierbei wird der innere Regelkreis (Massenstromregler) schneller eingestellt als der äußere (Sauerstoffregelkreis). Solche kaskadierten Regelkreise weisen oftmals bessere

Stabilitätseigenschaften auf, konvergieren schneller und können auf Störungen aggressiver reagieren. Für die in dieser Arbeit dargestellten Versuche wurde immer ein unterlagerter Massenstromregelkreis verwendet. In praktischen Anwendungen können jedoch auch eine Gebläseleistung-Massenstrom-Kennlinie oder eine Unterdruck-Massenstrom-Kennlinie verwendet werden.

Für komplexere Regelsysteme (wie der später dargestellten modellbasierten Regelung) werden mehrere Aktoren gleichzeitig als Stellgrößen eingesetzt. Für die von Bioenergy2020+ entwickelte modellbasierte Regelung (MBR) sind die wichtigsten Stellgrößen die Primär- und Sekundärluftmassenströme, sowie der Brennstoffmassenstrom. Die Kopplung zwischen den einzelnen Größen (die Primärluft beeinflusst beispielsweise stark die kurzfristige Leistung) wird im Regelalgorithmus zusätzlich mit beachtet. Auf eine explizite Darstellung der Sensoren und der unterlagerten Regelkreise in Blockschaltbildern, wird im Folgenden aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Diese Komponenten werden zusammenfassend als „Regelung“ bzw. „Sauerstoffregelung“ dargestellt.

Die vom Regelalgorithmus berechneten Stellgrößen u , sowie momentane Störungen (z.B. Druck-, Brennstoff-, Vergasungsschwankungen) beeinflussen die Feuerung ③. Die Bedingungen im Verbrennungsprozess ④ ergeben eine bestimmte Sauerstoffkonzentration c_{O_2} . Aus der momentanen CO- λ -Charakteristik der Anlage ⑤ ergibt sich wiederum durch die Sauerstoffkonzentration, eine bestimmte Kohlenmonoxidkonzentration c_{CO} . Wie in den vorhergehenden Kapiteln ausführlich diskutiert, ist die Form der CO- λ -Charakteristik von den aktuell herrschenden Bedingungen (Leistung, Brennstoff, Ausprägung der Luftstufung...) abhängig. Als Messgrößen der Feuerung stehen schließlich die O₂- sowie CO-Konzentration zur Verfügung. Die beiden gemessenen Konzentrationen c_{O_2} und c_{CO} werden nun in der entscheidenden Komponente – dem CO- λ -Schätzer ⑥ – weiterverarbeitet und dienen als Ausgangsgrößen des Kalmanfilters (KF) ⑦. Dieser übernimmt die Hauptfunktion des Schätzers, indem er die CO- λ -Charakteristik nach dem in 4.8.1 beschriebenen Algorithmus schätzt. Präziser ausgedrückt, schätzt der KF die Parameter x einer sogenannter Basisfunktion f . Hierfür benötigt er die Messgrößen c_{O_2} und c_{CO} , wie auch die Rauschmatrizen Q und R , welche vereinfacht gesagt angeben, welche stochastischen Schwankungen der CO- λ -Schätzer zu erwarten hat. Q stellt hierbei das Systemrauschen, welches den Modellierungsfehler abbildet und R das Messrauschen dar. Ausführliche Erklärungen zum verwendeten KF sind im anschließenden Kapitel 4.8.1 zu finden.

Die Basisfunktion f (bzw. die Funktionsparameter x) dient dazu, den momentanen Zusammenhang zwischen der Sauerstoff- und der CO-Konzentration zu approximieren. Neue Messdaten, welche sich nicht auf dieser Basisfunktion befinden, führen dazu, dass der Kalmanfilter die geschätzte Basisfunktion entsprechend „verformt“. Liegen neu erfasste Messwerte auf der geschätzten Basisfunktion, wird diese nicht verändert. In den hier vorgestellten Messungen sind als Basisfunktion immer einfache Parabeln verwendet worden. Denkbar sind auch andere Funktionstypen, mit beispielsweise steileren CO-Anstiegen auf

der Luftmangelseite. Hierbei ist es von besonderer Bedeutung, dass die Basisfunktion linear in den Parametern x ist. Gehen die Parameter x nichtlinear in die Basisfunktion ein, so muss ein sogenannter *extended kalman filter* auf Grund der Nichtlinearität eingesetzt werden¹. Mit den geschätzten Parabelparametern x wird anschließend die Position des Minimums der CO-Emissionen \hat{c}_{O_2} berechnet. Diese so geschätzte optimale O₂-Konzentration weist – je nach Auslegung des Kalmanfilters – zeitliche Schwankungen auf, da die Schätzung des KF über die Zeit variiert. Eine einfache und effiziente Lösung um diese Schwankungen zu reduzieren, stellt das Nachschalten eines zusätzlichen Standardtiefpassfilters dar (mehr dazu in Kapitel 4.8.4). Um den Regelkreis schlussendlich zu schließen, wird das gewonnene gefilterte Signal $c_{O_2,opt}$ anschließend als neuer Sollwert für den O₂-Regler verwendet. Dieser Ablauf wird in einem festen Zeitintervall wiederholt. Als sinnvoller Kompromiss zwischen Rechenaufwand und ausreichender Auflösung wurde in dieser Arbeit ein Zeitintervall von 1 s gewählt. Zu große Zeitintervalle verringern zum einen die Anzahl der verfügbaren Messdaten (Messrauschen schwieriger zu filtern auf Grund des Nyquist-Kriteriums), zum anderen erhöhen sie die Reaktionszeit des Schätzers. Deutlich kleinere Zeitintervalle als 1 s erhöhen den erforderlichen Rechenaufwand, ohne zusätzliche Informationen zu verarbeiten. In dieser Frequenz gehen nun neue Messwerte in den Schätzer ein und verbessern kontinuierlich die Approximation mittels der Basisfunktion. Daraus resultierend, verbessert sich die Schätzung der optimalen Sauerstoffkonzentration und die Anlage driftet in das gesuchte Emissionsoptimum.

4.8.1 Funktionsweise des Kalmanfilters

Im vorhergehenden Kapitel wurde die Grundidee des neuen Konzeptes illustriert und es soll an dieser Stelle auf die Funktionsweise des Kalmanfilters eingegangen, sowie die wichtigsten Gleichungen skizzieren werden. Eine detaillierte Beschreibung des KF und dessen Eigenschaften kann in entsprechender Standardliteratur für Regelungs-/Filtertechnik (z.B. [81, 82, 83]) gefunden werden.

Der Kalmanfilter ist auf eine Entdeckung des Mathematikers Rudolf E. Kálmán zurückzuführen und basiert auf einem Bayes'schen Minimum-Varianz-Schätzer. Der diskrete KF schätzt in einem festen Zeitintervall Δt die gesuchten Systemzustände x eines dynamischen linearen Systems. In der vorliegenden Anwendung als CO-O₂-Schätzer entspricht x den zu schätzenden Parabelparametern. Diese Anwendung wird in der Systemtheorie meist als *parameter estimation* anstatt der üblichen *state estimation* bezeichnet.

Aus Gründen der besseren Darstellung wird zuerst der Index k eingeführt mit $t_k = t_0 + \Delta t \cdot k$. Das zu filternde System kann beschrieben werden durch eine Differenzgleichung:

¹ Der Einsatz eines *extended kalman filter* hat in einigen Versuchen deutlich schlechteres Konvergenzverhalten gezeigt. Die Gründe hierfür konnten nicht eindeutig geklärt werden.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.18)$$

mit Eingang $u_k \in \mathbb{R}^m$ sowie den Systemmatrizen $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ und $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$. Beim Systemrauschen $w \in \mathbb{R}^m$ handelt es sich um eine normalverteilte Zufallsvariable mit dem Mittelwert 0 und der Varianzmatrix $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Für die Anwendung als CO-O₂-Schätzer sind die zu schätzenden Größen x , die Parameter der Basisfunktion f . Von diesen Parabelparametern x wird angenommen, dass sie rein stochastisch variieren. Systemtheoretisch wird dies als *random walk* bezeichnet. Die Dynamikmatrix A ist für den Fall des CO-O₂-Schätzers die Einheitsmatrix und die Eingangsmatrix B ist eine Nullmatrix¹. Übrig bleibt die Gleichung

$$x_k = x_{k-1} + w_{k-1} \quad (4.19)$$

für den *random walk* der Parabelparameter x_k zum Zeitpunkt t_k . Hinzu kommt die so genannte Messgleichung (für die CO-Konzentration), welche definiert ist durch

$$z_k = Hx_k + v_k. \quad (4.20)$$

Die Größe $z_k \in \mathbb{R}$ stellt den Messwert dar. Für den CO- λ -Schätzer entspricht dies der gemessenen CO-Konzentration c_{CO} zum Zeitpunkt k . Das Messrauschen $v_k \in \mathbb{R}$ ist (wie das Systemrauschen) eine normalverteilte Zufallsvariable mit dem Mittelwert 0 und der Varianzmatrix $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Die Beobachtermatrix $H \in \mathbb{R}^n$ wird dazu verwendet die Systemzustände x_k auf den Messwert abzubilden. Die Beobachtermatrix H stellt in diesem Zusammenhang mit der CO- λ -Regelung eine gewisse Besonderheit dar, da sie nicht konstant, sondern abhängig von der aktuellen Sauerstoffkonzentration ist. Im Folgenden wird vereinfachend nur auf eine Approximation mittels einer parabelförmigen Basisfunktion f eingegangen. Die entsprechenden Gleichungen lassen sich jedoch einfach für andere Basisfunktionen umschreiben. Wie in Gleichung 4.21 zu erkennen, wird mittels

¹ Die Eingangsmatrix B kann auch ungleich der Nullmatrix sein, wenn zusätzliche Informationen über die Veränderung der Parameter x bezüglich einer bekannten oder messbaren Größe vorhanden sind. Wenn beispielsweise die Auswirkung einer Leistungsänderung auf die Position des Minimums zuvor empirisch analysiert wurde, kann dies später über die Eingangsmatrix B mitbeachtet werden und entlastet damit den Kalmanfilter, welcher schließlich weniger starke Veränderungen der Parameter x schätzen muss.

der Sauerstoffkonzentration c_{O_2} der linear abhängige Vektor H aufgespannt.

$$H = \begin{bmatrix} c_{\text{O}_2}^2 \\ c_{\text{O}_2}^1 \\ c_{\text{O}_2}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\text{O}_2}^2 \\ c_{\text{O}_2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Der Vektor H wird so gewählt, dass H multipliziert mit dem Zustand x die gewählte Basisfunktion ergibt. Also im Falle von parabelförmigen Basisfunktionen:

$$Hx = \begin{bmatrix} c_{\text{O}_2}^2 \\ c_{\text{O}_2} \\ 1 \end{bmatrix} x = c_{\text{O}_2}^2 \cdot x_1 + c_{\text{O}_2} \cdot x_2 + x_3. \quad (4.22)$$

Im Folgenden muss insbesondere auf *a priori* und *a posteriori* Schätzungen eingegangen werden. Aus dem alten Schätzwert \hat{x}_{k-1} kann mittels der Gleichung 4.18 bzw. der vereinfachten Gleichung 4.19

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1} \quad (4.23)$$

ein neuer Schätzwert gewonnen werden. Dieser Schritt wird meist als *Prädiktionsschritt* bezeichnet¹. Ähnliches wird auch für die Kovarianzmatrix P berechnet. Die neue Schätzung für die Kovarianzmatrix errechnet sich aus

$$\hat{P}_k^- = A\hat{P}_{k-1}^-A^T + Q. \quad (4.24)$$

Da die Prädiktion meist den gemessenen Wert nicht vollständig erklären kann, wird im nächsten Schritt die Prädiktion korrigiert. Hierfür wird das so genannte *kalman gain* gebildet, welches sich durch

$$K_k = \hat{P}_k^- H^T (H\hat{P}_k^- H^T + R)^{-1} \quad (4.25)$$

berechnet. Ein hoher Wert für K bedeutet, dass der aktuellen Messung stark vertraut wird. Es bedeutet außerdem, dass die bisher geschätzten Zustände weniger stark ins Gewicht fallen und die Schätzung stärker entsprechend der neusten Messungen angepasst wird. Im Gegensatz bedeutet ein kleiner K -Wert, dass die aktuelle Messung nicht so stark ins Gewicht fällt und der bisherigen Schätzung eine höhere Bedeutung zukommt.

Schließlich wird der zuvor prädiizierte Zustand \hat{x}_k^- mittels des *kalman gains* korrigiert.

¹ Auch wenn streng genommen, bei *random walk* keine typische Prädiktion im herkömmlichen Sinne stattfindet.

Der neue Zustand lässt sich mit

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4.26)$$

berechnen. Auch die Prädiktion der Kovarianzmatrix muss im Anschluss korrigiert werden. Dies geschieht über die Gleichung:

$$\hat{P}_k = \hat{P}_k^- - K (H_k \hat{P}_k^- H_k^T + R) K^T. \quad (4.27)$$

Wie man auch an Gleichung 4.26 erkennen kann, wird der Zustand \hat{x}_k^- in Abhängigkeit des Fehlers $z_k - Hx_k^-$ korrigiert. Wenn beispielsweise die Zustände \hat{x}_k^- bereits eine perfekte lokale Schätzung der CO-O₂-Charakteristik darstellen (sodass $H\hat{x}_k^-$ gleich der Messung z_k entspricht), wird \hat{x}_k^- nicht korrigiert.

4.8.2 Formfilter

Für den Kalmanfilter müssen Mess- und Systemrauschen im Allgemeinen als weißes Rauschen vorliegen [84, 85]. Für praktische Anwendungen ist die Annahme, dass weißes Rauschen vorliegt, legitim, solange die Leistungsdichte des Rauschens unterhalb der Grenzfrequenz des Systems hinreichend konstant ist [86]. Kann diese Annahme nicht getroffen werden, so muss mit einer Erweiterung gearbeitet werden – den sogenannten Formfiltern. Mittels dieser kann das in der Realität auftretende farbige Rauschen in weißes Rauschen überführt werden, was die herkömmliche Behandlung mittels des Kalmanfilters erlaubt. Hieraus resultiert, dass sich die A -Matrix des dynamischen Systems nicht zu einer Nullmatrix vereinfachen würde. Sowohl simulative, als auch experimentelle Ergebnisse haben darauf hingedeutet, dass auf Formfilter ohne Performanceeinbußen verzichtet werden kann.

4.8.3 Bestimmung des optimalen Arbeitspunktes

Nach der Schätzung der CO-O₂-Charakteristik soll daraus ein optimaler Sollwert für den Sauerstoffregler berechnet werden. Das Thema des optimalen Arbeitspunktes wurde bereits in Kapitel 4.4 ausführlich diskutiert.

Für den CO-O₂-Schätzer wurde das Verfahren mit additivem Straffaktor gewählt. Zur gemessenen und normierten CO-Konzentration c_{CO} wird ein von der Sauerstoffkonzentration c_{O_2} abhängiger Strafterm addiert:

$$c_{CO} = c_{CO, gemessen} + \underbrace{c_{O_2} \cdot \frac{\Delta c_{CO}}{1}}_{\text{Straffaktor}}. \quad (4.28)$$

Ein Straffaktor von $50 \text{ mg/m}^3 \text{Vol.} - \%$ bzw. $\Delta c_{\text{CO}} = 50 \text{ mg m}^{-3}$ hat sich hierbei als praxistauglich erwiesen. Diese Methode erlaubt eine anschauliche Interpretation, dass eine Wirkungsgradsteigerung von etwa 1% eine Schadstoffsteigerung von 50 mg m^{-3} „wert“ ist. Die Wahl des Straffaktors ist also Ermessenssache und an die Anforderungen an die Feuerung gebunden. Sind besonders strenge Anforderungen an die Emissionen vorhanden ist die Wahl eines hohen Straffaktors empfohlen.

4.8.4 Tiefpassfilter zur Glättung des Sauerstoffsollwertes

Wie bereits erwähnt, schwankt der optimale Schätzwert des Kalmanfilters. Um die geschätzten optimale Sauerstoffkonzentrationen zu glätten, wird der Schätzung ein Tiefpassfilter nachgeschaltet. Für die Arbeiten innerhalb dieser Dissertation kamen ausschließlich einfach Verzögerungsglieder erster Ordnung zum Einsatz (vgl. Gleichung 4.29), wobei natürlich auch Filter höherer Ordnung wie Tschebyscheff- oder Butterworthfilter verwendet werden können. Das Verzögerungsglied kann einfach in der Laplace-Darstellung durch

$$C_{\text{O}_2,s} = \frac{1}{1 + T_S} C_{\text{O}_2,opt} \quad \text{mit } T > 0 \quad (4.29)$$

mit einer empirisch festgelegten Filterkonstanten T dargestellt werden. Je nach Auslegung des Filters passt sich der Sollwert schneller an Änderungen der Schätzung an oder glättet stärker kurzfristige Fluktuationen.

4.8.5 Erweiterungenpotentiale

Im Rahmen dieser Dissertation stand der grundsätzliche Funktionsnachweis des CO- λ -Regelkonzeptes im Vordergrund. Es lassen sich jedoch eine Vielzahl von möglichen Erweiterungen vorstellen, welche Robustheit und Geschwindigkeit des Konzeptes weiter erhöhen. Im Folgenden seien einige potentielle (jedoch nicht validierte) Erweiterungen skizziert.

Veränderung von Kovarianzmatrix: Die Kovarianzmatrix gibt an, welche Veränderungen der Parameter der Basisfunktion zu erwarten sind. Diese Veränderung ist im stationären Betrieb ungleich kleiner als beispielsweise beim Hochfahren der Anlage. Eine Möglichkeit wäre also, immer dann, wenn davon ausgegangen werden kann, dass sich die optimale Luftzahl ändert, auch den Betrag der Kovarianzmatrix Q zu vergrößern. Ein Beispiel wäre eine lineare Abhängigkeit zur Leistungsänderung:

$$|Q| = |Q_0| \left| \frac{\delta P}{\delta t} \right| \quad (4.30)$$

mit der betragsmäßig kleinsten Kovarianzmatrix Q_0 und der zeitlichen Ableitung der Leistung $\frac{\delta P}{\delta t}$.

Kompensation des Leistungseinflusses: Ist bereits der Einfluss der Leistung bei einer Feuerung näher untersucht, so kann auch ein leistungsabhängiger Faktor zum Sauerstoffsollwert addiert werden, um den CO-O₂-Schätzer zu entlasten. Etwaige Modellierungsungenauigkeiten werden dann vom CO-O₂-Schätzer kompensiert.

4.8.6 Eingesetzter Sauerstoffregelkreis

Im Rahmen dieser Arbeit kamen zwei verschiedene Sauerstoffregler zum Einsatz. Zum einen ein modellbasierter Regelungsansatz der Bioenergy2020+ GmbH, zum anderen ein neu entwickelter Sauerstoffregler basierend auf einfachen PID-Reglern. Die Stärken des modellbasierten Reglers (MBR) liegen in der Fähigkeit die Systemeingänge zu entkoppeln. So bewirkt beispielsweise im Idealfall eine Änderung der thermischen Leistung keine Änderung der Sauerstoffkonzentration. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in dieser Arbeit auf eine detaillierte Beschreibung des modellbasierten Reglers verzichtet und auf die entsprechende Literatur verwiesen [87, 47, 88, 43]. Um nachzuweisen, dass das CO-O₂-Regelkonzept unabhängig vom unterlagerten Sauerstoffregler ist, wurde als zweite Variante ein klassischer PID-Sauerstoffregler mit einer Erweiterung eingesetzt.

Bereits in zahlreichen Arbeiten (z.B. [16, 44, 49]) wurde gezeigt, dass die Primärluftmenge einen starken Einfluss auf die Sauerstoffkonzentration c_{O_2} hat. Dieses Potential wird bei nahezu allen bisherigen Regelstrategien vernachlässigt (mit Ausnahme der MBR) und ausschließlich die Sekundärluftmenge oder die Gesamtluftmenge zur Regelung der Luftzahl (bzw. Sauerstoffkonzentration) verwendet. Verallgemeinerte Faustregeln wie „Sekundärluft zur Sauerstoffregelung und Primärluft zur Leistungsregelung“ sind weit verbreitet und vernachlässigen dabei die Tatsache, dass die Primärluftmenge als wichtiger Akteur zur O₂-Regelung verwendet werden kann und sollte. Auch moderne Hackschnitzel- und Pelletfeuerungen am Markt verwenden zur Sauerstoffregelung ausschließlich die Sekundärluft. Zum Teil ist dies begründet, denn die Primärluft weist insbesondere den Nachteil eines sogenannten *inverse response*-Verhaltens auf. Das bedeutet, bei einer sprungförmigen Erhöhung der Primärluft, fällt der Sauerstoffgehalt kurzfristig; erhöht sich nach einigen Sekunden (üblicherweise zwischen 10s und 3 min) und steigt schließlich auf ein höheres Niveau (in Summe steht natürlich eine größere Sauerstoffmolmenge zur Verfügung, während die Brennstoffmenge konstant bleibt). Abbildung 4.16 illustriert den typischen zeitlichen Verlauf der Sauerstoffkonzentration auf sprungförmige Änderung der Primärluftmenge. Durch den zusätzlich eingebrachten Sauerstoff in der Primärzone der Feuerung wird über die deutlich erhöhte Temperatur kurzfristig größere Mengen an brennbaren Gasen freigesetzt, welche für typischerweise 20-60 Sekunden den Sauerstoffgehalt deutlich erniedrigen. Erst langfristig stellt sich eine höhere Sauerstoffkonzentration auf Grund des in Summe höheren Gesamtluftmassenstromes ein. Im Allgemeinen ist diese Eigenschaft der Primärluft als Nachteil zu sehen, da sich die Anlage durch das *inverse response*-Verhalten

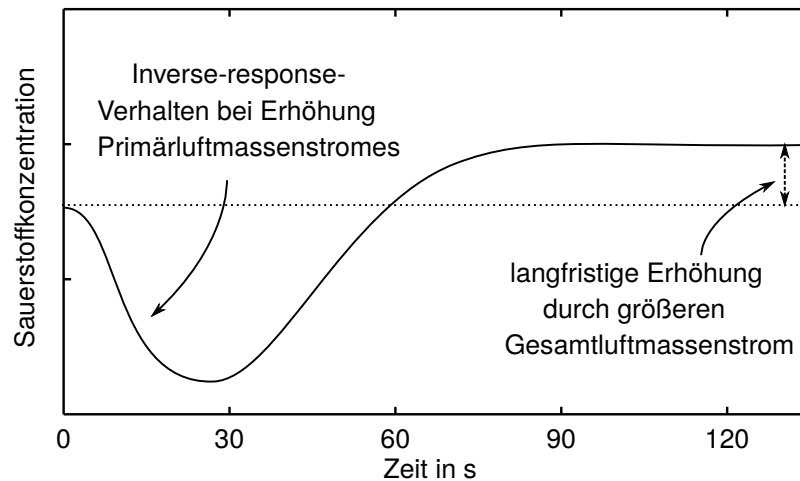


Bild 4.16: Typisches *inverse-response*-Verhalten der Sauerstoffkonzentration unter Vergrößerung des Primärluftmassenstromes m_p und konstanten Sekundärluftmassenstromes m_s .

der Primärluft schwieriger regeln lässt. Als Folge sind nur sehr langsame Änderungen der Primärluft zulässig, bei welchen das *inverse response*-Verhalten weniger stark auftritt. Da der Sekundärluftmassenstrom diese Eigenschaft nicht besitzt¹, wird dieser meist zur Regelung der Sauerstoffkonzentration verwendet und es wird auf den Primärluftmassenstrom als Aktor verzichtet.

In dieser Arbeit wird die Nutzung der Primärluft zur Regelung der Sauerstoffregelung vorgeschlagen. Bei dieser Erweiterung der klassischen Sauerstoffregelung, wird die Primärluft in Kombination mit der Sekundärluft in Form eines zusätzlichen zweiten O_2 -Reglers eingesetzt. Idee der erweiterten O_2 -Regelung ist es, zusätzlich zur Regelung der Sauerstoffkonzentration durch den Gesamtmassenstrom, m_p als Stellgröße zu verwenden. Es wird also bei diesem Regler ein zweiter paralleler Regelkreis mit m_p als Stellgröße hinzugefügt. Vereinfacht bedeutet dies, dass bei Zunahme der Primärluft gleichzeitig auch die Sekundärluft um den gleichen Massenstrom fällt. Langfristig (im Sinne mehrerer Minuten) ist unter Änderung von m_p keine Änderung des Sauerstoffgehaltes zu erwarten, da schließlich die Gesamtmolmenge an zur Verfügung stehendem Sauerstoff durch den gleichzeitig veränderten Sekundärluftmassenstrom konstant bleibt. Kurzfristig lässt sich die Sauerstoffkonzentration jedoch stark durch eine Variation des Verhältnisses $v = \frac{m_p}{m_p + m_s}$ beeinflussen. Die Absenkung des Primärluftmassenstromes führt kurzzeitig zu einem deutlich geringeren Brennstoffabbau, welcher wiederum – verstärkt durch das gleichzeitige Erhöhen des Sekundärluftmassenstromes – zu einem erhöhten O_2 -Gehalt führt. Auf diese Weise erhält man einen „künstlichen“ Aktor, welcher aggressiv in einem

¹ Die Sekundärluft weist *inverse response*-Verhalten auf, da sie nahezu keine Rückkopplung zum Glutbett und damit keinen direkten Einfluss auf die Vergasungsrate hat.

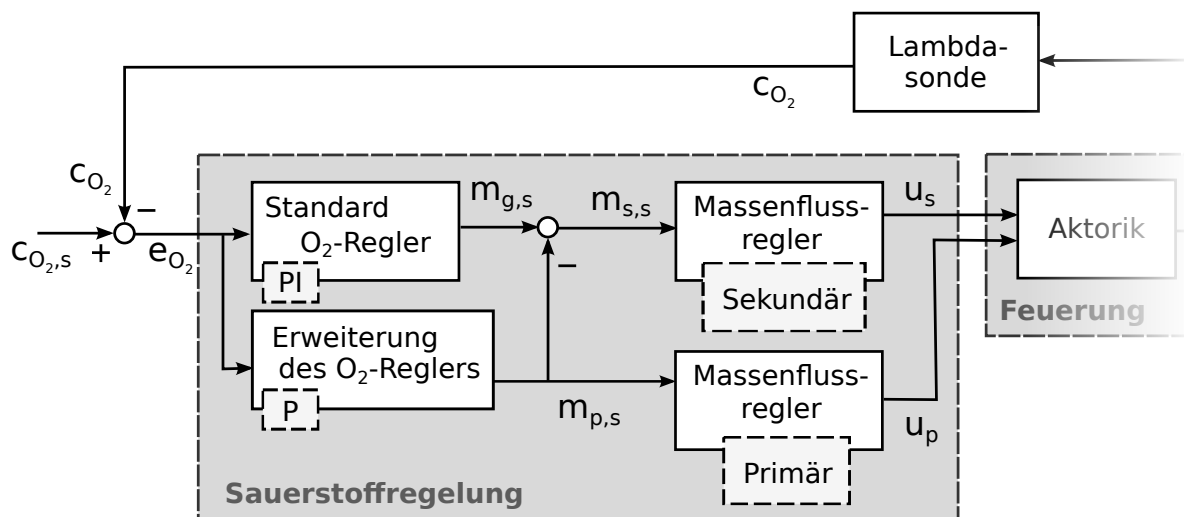


Bild 4.17: Erweiterter Sauerstoffregelkreis mit Verwendung des Primärluftverhältnisses als Stellgröße. Zwei getrennte Regler geben sowohl die Stellgröße m_g sowie m_p vor.

kurzen Zeitintervall wirkt, langfristig jedoch eine Verstärkung von null aufweist. Abbildung 4.17 zeigt die Struktur dieses erweiterten Regelkreises, welcher die Sauerstoffkonzentration $c_{O_2,s}$ über die beiden Größen m_s und m_p regelt. Wie in Abbildung 4.17 ebenfalls zu erkennen, wird die, von der Lambasonde gemessene Sauerstoffkonzentration c_{O_2} mit dem Sollwert $c_{O_2,s}$ verglichen und der Regelfehler e_{O_2} den beiden Reglern zugeführt. Es handelt sich einmal um einen klassischen PI-Regler, welcher über den Gesamtluftmassenstrom die Sauerstoffkonzentration regelt. Zum anderen ein m_p -P-Regler, welcher den Primärluftmassenstrom als Stellgröße verwendet. Aus m_p kann schließlich der sekundäre Luftmassenstrom berechnet werden. Die Sollwerte der Massenströme werden wiederum den Luftmassenstromreglern zugeführt, welche die entsprechenden Gebläse ansteuern. Besondere Beachtung sollte der Verwendung von reinen P-Reglern beim m_p -Regler beigemessen werden. Für diesen Regelkreis dürfen keine integrierenden Anteile verwendet werden, da ansonsten langfristig das Primärluftverhältnis λ_p driftet würde. Da λ_p den Grad der Luftstufung einer Feuerung beschreibt, ist dies nicht wünschenswert, da der mittlere Grad der Luftstufung vom Feuerungshersteller gewählt wird (man denke an NO_x-Reduktion). Für den Standardsauerstoffregler steht es jedoch frei, PI- oder PID-Regler einzusetzen. Die beschriebene Erweiterung der Sauerstoffregelung lässt sich in einfacher Art und Weise in nahezu alle bestehenden Kleinf Feuerungsanlagen integrieren (einzige Forderung ist eine Unterteilung in Primär- und Sekundärluft), erfordert weder zusätzliche Sensorik¹ und ist ohne nennenswerten Programmieraufwand zu implementieren.

¹ Wie auch bei dem klassischen Sauerstoffregler, gilt, dass sich die Regelgüte durch den Einsatz unterlagerter Luftmassenströme verbessert.

Tab. 4.2: Vor- und Nachteile der klassischen Sauerstoffregelung und der Erweiterung durch die Stellgröße m_p .

Stellgröße	Vorteile	Nachteile
m_s bzw. m_g	Bei kleinen Anlagen kann auf das Primärluftgebläse verzichtet werden	Großer Stellgrößenaufwand zur Regelung erforderlich
	Nur zwei Einstellparameter (PI) zu optimieren	Starke Druckschwankungen auf Grund schnell wechselnder Massenströme
m_p und m_g	Aggressiver Regler möglich	Zusätzlicher Freiheitsgrad zum Optimieren
	Druckschwankungen sind deutlich geringer	Glutbett wird durch die Primärluftvariation angeregt und die Brennstoffmenge im Glutbett variiert. Leistungsschwankungen tendieren dazu größer zu werden

Eine verringerte Standardabweichung muss nicht unmittelbar zu einer Verbesserung der Emissionen führen, jedoch erlaubt es die Anlage bei tieferen Sauerstoffkonzentrationen zu betreiben als es bei höheren Standardabweichungen der Fall wäre.

Zusammenfassung der Sauerstoffregelung mit Primärluftmenge als Stellgröße:

- Die Primärluft ist trotz ihres *inverse response*-Verhaltens ein wichtiger Akteur zur Regelung der Sauerstoffkonzentration.
- Die Kombination aus einfachem P-Regler, welcher $v = \frac{m_p}{m_p + m_s}$ als Stellgröße in Kombination mit einem klassischen Sauerstoffregler verwendet wird, birgt Potentiale zur Verbesserung der Sauerstoffregelung.

4.9 Besonderheit des Bezuges der CO-Emissionen auf eine Sauerstoffkonzentration

Eine Besonderheit des Regelkonzeptes stellt der Bezug der CO-Emissionen c_{CO} auf die Sauerstoffkonzentration dar. Die Kohlenmonoxidkonzentration wird von preisgünstiger CO-Sensorik ausschliesslich feucht und unbezogen ausgegeben. Im Interesse des Regelkonzeptes ist jedoch die Minimierung der normierten Konzentration, da diese die tatsächliche Emission darstellt. Das folgende Kapitel beschreibt eine feuerungstechnisch unübliche Normierung der feuchten Kohlenmonoxidkonzentration auf eine feuchte Sauerstoffkonzentration und zeigt, warum diese Normierung für das Regelkonzept zu empfehlen ist.

Während im Allgemeinen üblich ist, die trockenen CO-Emissionen $c_{CO,tr,RG}$ mittels der trockenen O₂-Konzentration $c_{O_2,tr,RG}$ im Abgas auf eine gewünschte (hier 13 Vol. – %) O₂-

Konzentration zu normieren, ist dies für einen CO-O₂-Regler nicht möglich, da schließlich nur die feuchten Konzentrationen $c_{\text{CO},ft,RG}$ und $c_{\text{O}_2,ft,RG}$ zur Verfügung stehen. Da die Normierung jedoch einen dominierenden Einfluss auf die tatsächliche Emission hat, soll nicht vollständig auf eine Normierung verzichtet werden. Um den Bezug der Konzentration zumindest teilweise zu kompensieren, wird vorgeschlagen, die feuchte CO-Konzentration mit der feuchten O₂-Konzentration auf 13 Vol. – % feuchte Basis zu normieren, auch wenn dies nicht dem Ergebnis der exakten Normierung entspricht. Die hierdurch resultierende Abweichung lässt sich mit den folgenden Gleichungen 4.31-4.9 aufzeigen.

$$c_{\text{CO},tr,13 \text{ Vol.} - \%} = c_{\text{CO},tr,RG} \cdot \frac{20,95 - 13}{20,95 - c_{\text{O}_2,tr,RG}} \quad (4.31)$$

$$= c_{\text{CO},tr,RG} \cdot \frac{20,95 - 13}{20,95 - c_{\text{O}_2,tr,RG}} \cdot \frac{1 - \varphi_{RG}}{1 - \varphi_{RG}} \quad (4.32)$$

$$= c_{\text{CO},ft,RG} \cdot \frac{20,95 - 13}{\frac{20,95}{1 - \varphi_{RG}} - c_{\text{O}_2,ft,RG}} \quad (4.33)$$

Die Größen und Indizes stehen für:

RG	Rauchgas	tr	trocken
φ	Luftfeuchte in Vol.-%	ft	feucht.

Wie in der Gleichung illustriert, wird die Abgasfeuchte φ_{RG} zur Berechnung benötigt. Diese ist zum Zeitpunkt des Betriebs einer Anlage jedoch nicht bekannt. Auch wenn sich dadurch Abweichungen ergeben, muss vereinfachend angenommen werden, dass $\varphi \approx 0$ gilt. Abbildung 4.18 zeigt die dadurch hervorgerufenen Abweichung in Prozent. Dargestellt ist zum einen die prozentuale Abweichung nach Normierung mittels der feuchten Sauerstoffkonzentration, zum anderen die prozentuale Abweichung eines ideal¹ kalibrierten Sensors (kalibriert bei 13 Vol. – % und 45 Gew. – %OS. Brennstofffeuchte). Für nahezu den gesamten Arbeitsbereich wirkt die Normierung reduzierend auf die prozentuale Abweichung. Je höher der Brennstoffwassergehalt, desto weniger präzise² ist die Normierung mittels feuchter Sauerstoffkonzentration. Grundsätzlich lässt sich zusammenfassen, dass eine „feuchte“ Normierung für das Regelkonzept empfehlenswert ist. Trotz alledem sind mit Abweichungen in der Größenordnung von 25 % bis –20 % im typischen Arbeitsbereich von 5 Vol. – % bis 15 Vol. – % Sauerstoff zu rechnen.

In den folgenden Diagrammen und Tabellen, in welchen Ergebnisse von Versuchen dargestellt werden, sind ausschließlich die trocken-normierten Konzentrationen der Rauch-

1 „Ideal“ bezeichnet für die Kalibrierung des Sensors, dass der Brennstoffwassergehalt, sowie die Normierung auf 13 Vol. – % an einem Arbeitspunkt (13 Vol. – % und 45 Gew. – %OS. Brennstoffwassergehalt) durch einen Offset ausgeglichen werden.

2 Eine weitere Verbesserung könnte erreicht werden, wenn eine geschätzte Abgasfeuchte bereits im Vorhinein mit verrechnet werden würde. Auf diesen Schritt wurde in dieser Arbeit jedoch verzichtet.

gasanalytik (RGA) gezeigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit, wird im Folgenden auch auf den Index für *feucht* und *trocken* sowie Basis der Normierung verzichtet.

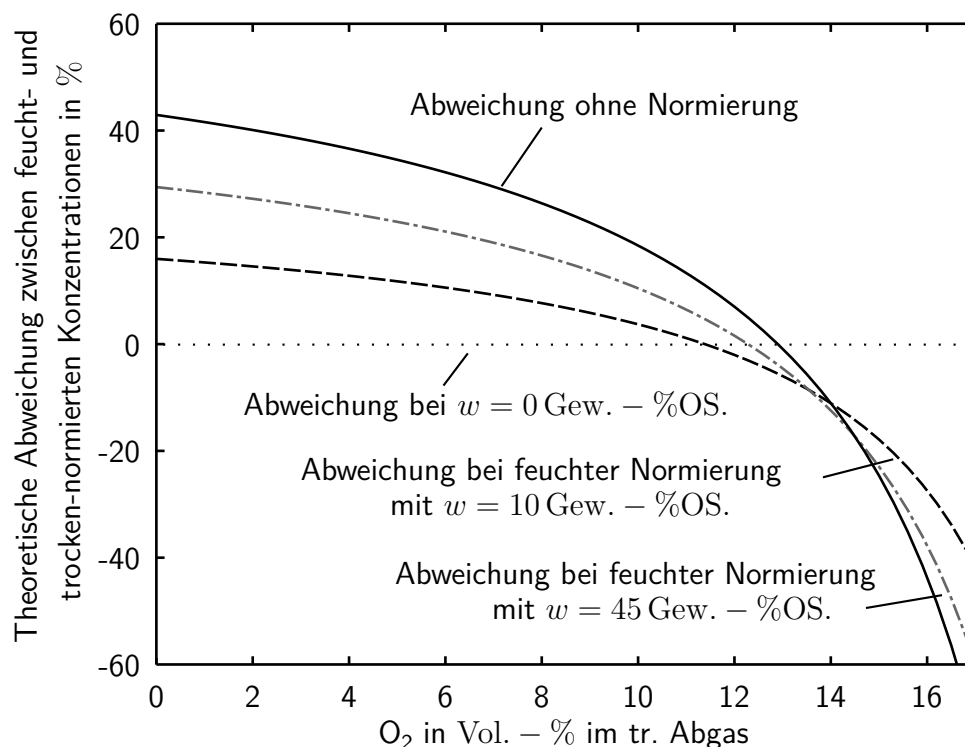


Bild 4.18: Prozentuale Abweichung $(1 - c_{ft. norm.}/c_{tr. norm.})$, welche durch „feuchte“ Normierung entsteht, aufgetragen für 10 Gew. - %OS. und 45 Gew. - %OS. über der trockenen O₂-Konzentration. Zum Vergleich ist die Abweichung ohne Normierung (bei idealem Abzug der Abgasfeuchte) aufgetragen. OS bezeichnet Originalsubstanz (also feucht).

Für die Bewertung von Emissionen werden meist Mittelwerte herangezogen. Die zu betrachtenden Gaskonzentrationen sind hierbei über ein geeignetes Mittelungsintervall zu normieren. Dies stellt eine nichttriviale Problem dar. In [89] wird bei automatisch beschickten Anlagen, mit Regelung der Luftzufuhr, die Normierung in der Samplingfrequenz des Messgerätes (beispielsweise im Sekundentakt) und eine anschließende Mittelung empfohlen. Bei Anlagen die brennstoffgeregelt oder im Batchbetrieb betrieben werden, wird hingegen empfohlen, zuallererst zu mitteln und darauf folgend zu normieren. Alle CO-Werte in dieser Arbeit beziehen sich ausschließlich auf sekundliche Normierung und eine anschließende Mittelung über das Messintervall. Neben den Argumentationen von Nussbaumer und Kerschbaumer [89] entspricht dies auch der regelungstechnischen Realität, da die CO-Konzentrationen in „Echtzeit“ verarbeitet werden müssen ¹.

¹ Eine Alternative zur Normierung über eine Sekunde würde beispielsweise eine Normierung über jeweils die letzten 15 min darstellen.

5 Validierung des neuen Regelkonzeptes

5.1 Einführendes Beispiel zum Start der Regelstrategie

Nachdem in Kapitel 4 die Funktionsweise des CO-O₂-Regelkonzeptes zu finden war, folgt in diesem Kapitel ein illustrierendes Beispiel zur Funktionsweise an der realen Feuerung. Im ersten Beispiel wird die Startphase des CO-λ-Regelkonzeptes veranschaulicht. Abbildung 5.1 zeigt die Gaskonzentrationen über einen Versuchszeitraum von 30 min. Die Dauer der einzelnen Phasen entspricht bewusst nicht derer im praxisüblichen Betrieb. Die einzelnen Phasen wurden künstlich verlängert, um in diesem ersten Beispiel ein besseres Verständnis für den zeitlichen Ablauf der CO-λ-Regelung zu vermitteln.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ min wird der Kalmanfilter eingeschaltet. Im realen Betrieb geschieht das normalerweise wenige Minuten nach Start der Anlage – somit typischerweise noch in der Hochfahrprozedur. Der Regelkreis ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht geschlossen und der Kalmanfilter übernimmt noch nicht die Vorgabe des Sauerstoffsollwertes. Beim Auswerten und Vergleich mehrerer handelsüblicher Feuerungsregelungen hat sich gezeigt, dass beim Hochfahren der Anlage meist O₂-Sollwerte eingestellt werden, die 1 Vol. – % bis 2 Vol. – % über der optimalen O₂-Konzentration im stationären Vollastbetrieb liegen. Dem Glutbett wird meist eine höhere Menge an Primärluft zur Verfügung gestellt, um schneller zu einem vollständig durchgezündeten Glutbett zu kommen. Der Sekundärluftmassenstrom wird meist ähnlich zu den Einstellungen des stationären Zustandes eingestellt, um einen ausreichenden Gasphasenausbrand zu gewährleisten. Auch im gezeigten Beispiel befindet sich die Sauerstoffkonzentration (①) beim Start des Versuches über dem Optimum im stationären Betrieb. In den ersten Sekunden nach dem Start des KF, fluktuiert die Schätzung der optimalen Sauerstoffkonzentration () noch stark, da nur wenige Messdaten zur Schätzung der CO-O₂-Charakteristik vorhanden sind. Als Initialisierung der Parabel wurden in diesem Fall absichtlich schlechte Startwerte¹ gewählt. Die natürliche Fluktuation des Sauerstoffgehaltes und der sich ergebenden CO-Emissionen führen dazu, dass eine immer größere Anzahl an Messdaten zur Verfügung stehen und die Schätzung sich über die

¹ Das Wählen schlechter Startwerte entspricht dem *worst-case*-Szenario, wenn keinerlei Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen CO und O₂ vorhanden sind. In der tatsächlichen Anwendung, werden selbstverständlich Startwerte gewählt, welche auch physikalisch sinnvoll sind. Beispielsweise können als Startwerte für die Parabelparameter die Ergebnisse des letzten Betriebes verwendet werden.

Zeit immer weiter verbessert. Wie in der Abbildung zu erkennen, erreicht der Kalmanfilter bereits nach einigen Sekunden eine qualitative Schätzung dafür, ob tendenziell höhere oder tiefere O_2 -Konzentrationen zu einer Verbesserung der CO-Emissionen führen würden. Nach 3-8 Minuten ist der Kalmanfilter im Allgemeinen zu einer physikalisch sinnvollen¹ Lösung konvergiert. Am gezeigten Beispiel sieht man, dass der Sauerstoffgehalt durch Unregelmäßigkeiten in der Vergasung nach ca. 7 min auf 6 Vol. - % fällt. Zum selben Zeitpunkt ist an den Kohlenmonoxidkonzentrationen zu erkennen, dass die tiefe Sauerstoffkonzentration zu deutlich günstigeren Verbrennungsbedingungen führt. Ähnliches „lernt“ der KF mit dem Sammeln dieser neuen Messwerte. Nach einem empirisch bestimmten Zeitintervall (im vorliegenden Beispiel nach ca. 7 min bis 10 min nach Start) kann der Regelkreis geschlossen werden. Durch den Tiefpassfilter verschiebt sich nun der Sollwert in Richtung des geschätzten Optimums ③ und die tatsächliche Sauerstoffkonzentration wird auf diesen Sollwert nachgeregelt. Wie gezeigt wurde, ist der CO- O_2 -Regler in der Lage, selbstständig die optimale Sauerstoffkonzentration zu bestimmen.

Als nächstes Beispiel wird das Verhalten des Kalmanfilters für eine sprunghafte Änderung der Leistung gezeigt. Abbildung 5.2 zeigt die Ergebnisse. Im Versuch wird ein Leistungssprung von Vollast (28 kW) auf Teillast (15 kW) gefahren. Das System ist zuvor eine Stunde auf Vollast betrieben worden (Warmstart). Das Umschalten erfolgt sprunghaft. Deutlich zu erkennen ist, dass sich das System nach dem Einschalten des KF ① in einen stationären Zustand fährt ②. Ab Minute 32 wird auf Teillast umgeschaltet (bedeutet regelungstechnisch nur, dass der Brennstoffmassenstrom reduziert wird) und Emissionen steigen innerhalb weniger Minuten an. Dies liegt insbesondere daran, dass sich das System in Vollast bereits sehr nahe an die CO-Kante „herangetastet“ hat und nun – da die Leistung geringer ist – die Sauerstoffkonzentration zu gering ist. Ab Minute 32 detektiert der CO- λ -Schätzer die veränderten Verbrennungsbedingungen und hebt die Sollsauerstoffkonzentration auf das „richtige“ Niveau an. In Minute 60 sind die gemittelten Emissionen nahezu wieder auf dem Niveau von Vollast. Dieses erste Beispiel demonstrierte, dass das CO- λ -Regelkonzept grundsätzlich in der Lage ist, sich an verändernde Bedingungen, wie einer Leistungsänderung, anzupassen.

1 Physikalisch sinnvoll sind je nach Anlage, eine Konzentration zwischen 3 und 10 Vol. - %

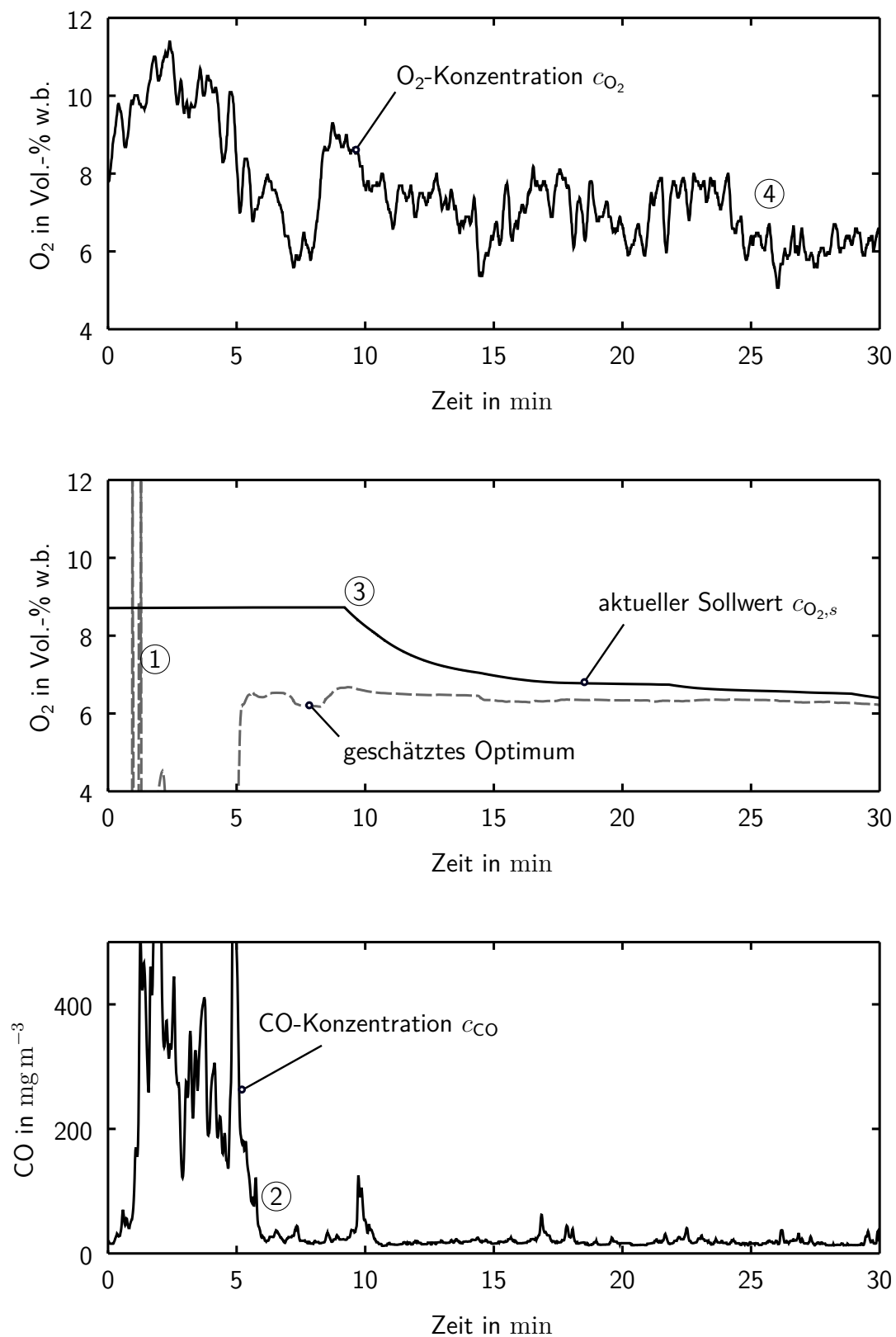


Bild 5.1: Ergebnisse zur Verdeutlichung des Funktionsprinzips. ① Aktivierung des Schätzers ②, „Erlernen“ der Charakteristik ③, Regelkreis wird geschlossen ④, tiefes Sauerstoffniveau bei minimalen Emissionen.

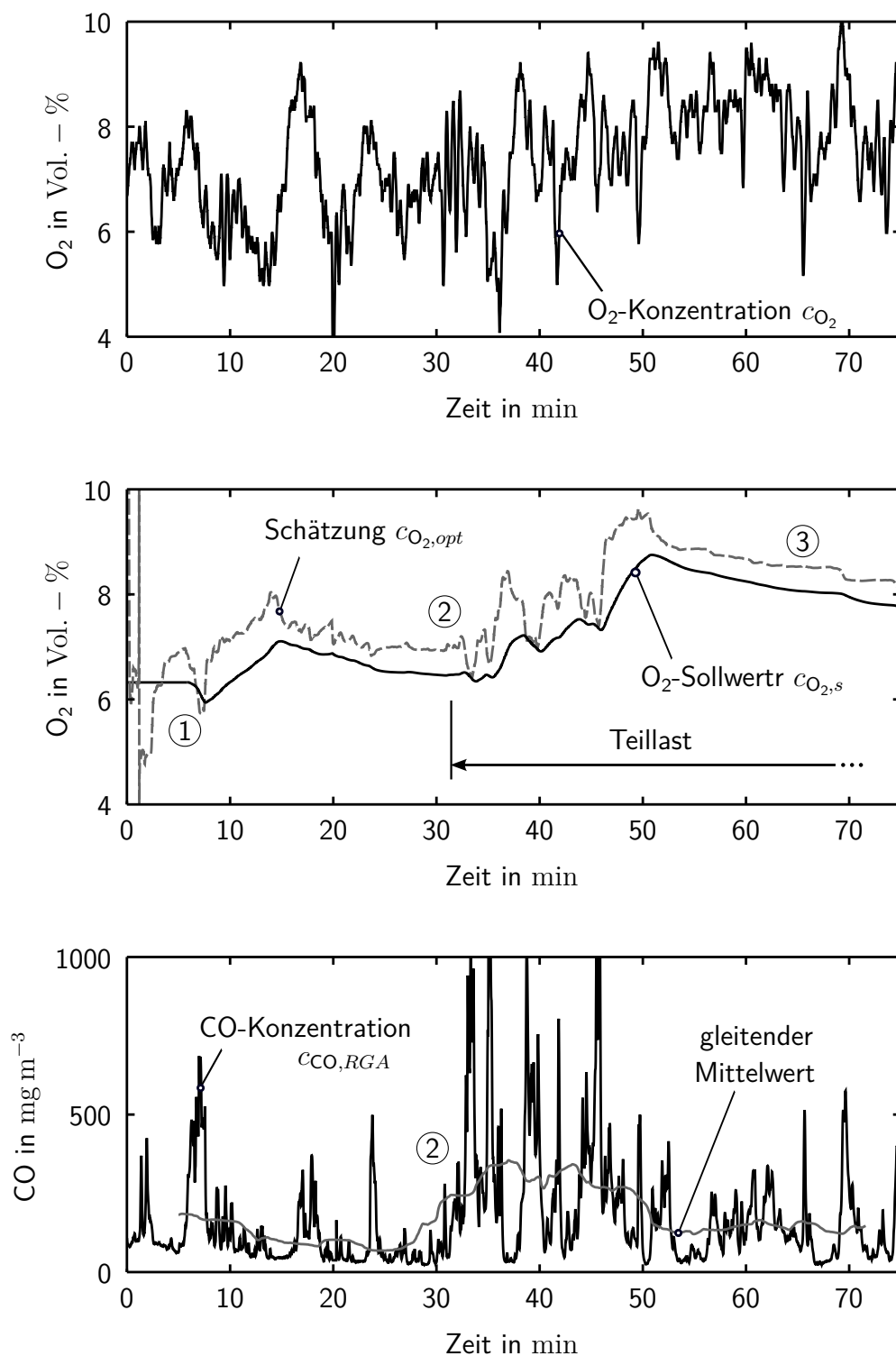


Bild 5.2: Ergebnisse aus Versuchen mit einer Leistungsänderung von VL auf TL (50%). ① Aktivierung Regler ② sprunghaftes Umschalten auf Teillast ③ höheres Sauerstoffniveau auf Teillast.

5.2 Experimentelle Validierung unter Einfluss von Störgrößen

Neben der Vorvalidierung in der Simulationsumgebung, wurden intensive Untersuchungen zum Regelverhalten im tatsächlichen Betrieb angestellt. Das folgende Kapitel stellt einige der wichtigsten Versuchsergebnisse zusammen.

5.2.1 Einstellungen für die Validierung CO- λ -Schätzer

Für die Validierung werden die Ergebnisse mit und ohne CO- λ -Schätzer verglichen. Um die Sauerstoffkonzentration ohne CO- λ -Schätzer näherungsweise optimal einzustellen, wurde eine leistungsabhängige Sollwertgleichung hinterlegt. Abbildung 5.3 zeigt die Einstellung der Sauerstoffsollwerte für verschiedene Leistungen. Die optimalen Sauerstoffkonzentrationen sind aus zuvor durchgeführten Experimenten entnommen¹ und dienen als Stützstellen für die Interpolation. Zwischen den Werten wurde anschließend linear über die Leistung interpoliert. Mögliche Einflüsse von Brennstofffeuchteänderungen wurden vernachlässigt. Die optimalen Sauerstoffkonzentrationen sind mit der modellbasierten Regelung (MBR), einer Primärluftzahl von 0,8 und einer Brennstofffeuchte von circa 30 Gew. – %OS. bestimmt worden. Dieses Vorgehen entspricht der typischen Optimierung beim Kesselhersteller, wobei dieser für verschiedene Leistungen optimale Sauerstoffkonzentrationen bestimmt und anschließend interpoliert. Abbildung 5.4 zeigt den optimalen Parabelfit des Kalmanfilter für zwei verschiedene Leistungen (30 kW und 15 kW). Wie zu erkennen, liegen bei der Hackschnitzelanlage die Emissionen bei Teillast ($>380 \text{ mg m}^{-3}$) deutlich über den Emissionen bei Vollast ($>10 \text{ mg m}^{-3}$). Außerdem kommt es zu einer Verschiebung des Minimums um circa 0,8 Vol. – % zu geringeren O₂-Konzentrationen. Zu Zwecken des Vergleiches, wurden drei verschiedene Regler-Konfigurationen zur Validierung gewählt: Erstens, die modellbasierte Regelung von Bioenergy2020+ ohne Schätzer (MBR), zweitens die MBR mit Schätzer (CO-O₂-MBR) und drittens einen PID-Regler mit CO- λ -Schätzer (CO-O₂-PID).

¹ Bei diesen Experimenten wurde die Anlage bei konstanter Leistung betrieben und der CO-O₂-Schätzer verwendet, um die optimale Sauerstoffkonzentration zu bestimmen.

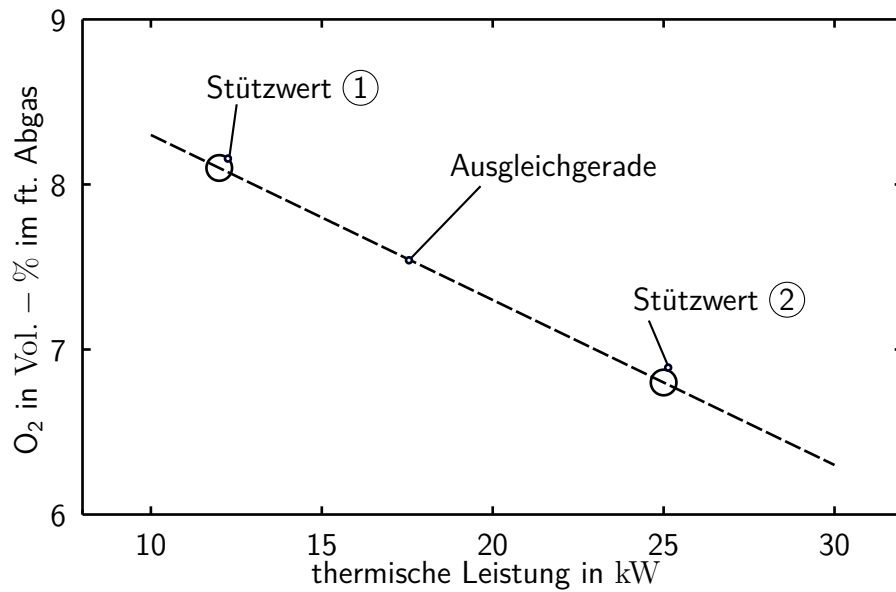


Bild 5.3: Einstellung der Sauerstoffregelung MBR mit optimalen Sauerstoffwerten für verschiedene Leistungen. Zwischen den beiden optimalen Stützstellen ① und ② wurde linear interpoliert.

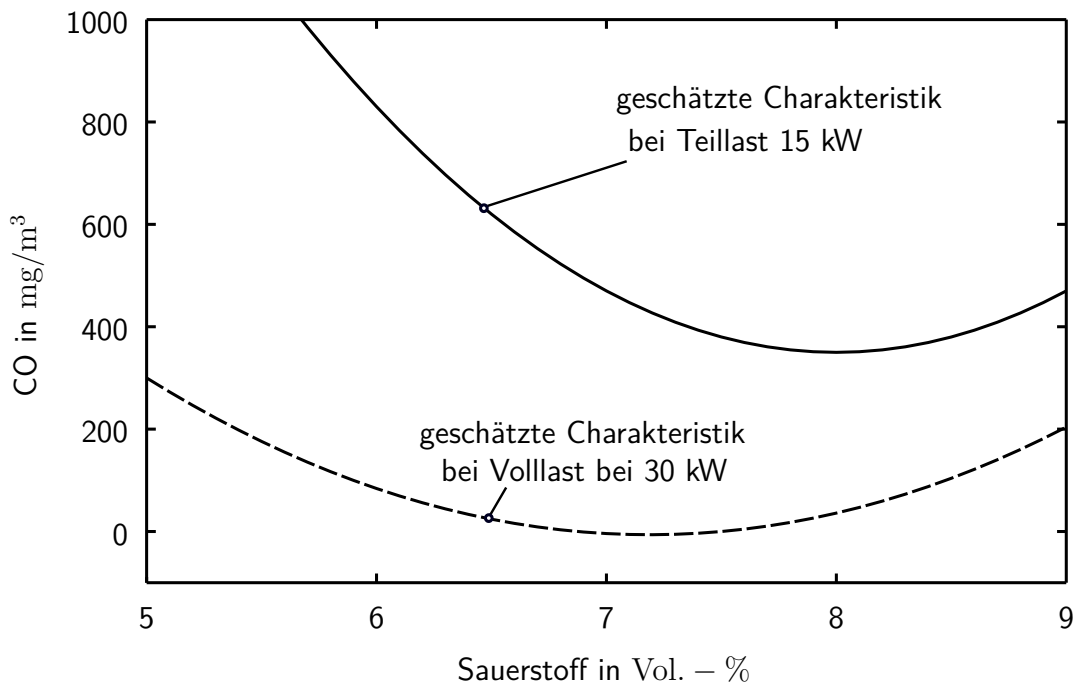


Bild 5.4: Parabelfit an Messwerte zweier Messungen mit unterschiedlicher Leistung (30 kW und 15 kW). Teillast (15 kW) führt zu einer Anhebung der CO-Emissionen sowie zu einer Verschiebung des Minimums um 0,8 Vol.-% zu höheren Sauerstoffkonzentrationen.

5.2.2 Lastzyklen

Kleinf Feuerungsanlagen sind – verglichen mit größeren Feuerungen – starken Leistungsänderungen über den Tagesverlauf unterworfen. Um das Verhalten der CO- λ -Regelung bei veränderlicher Last zu analysieren, wurde ein verkürztes Tageslastprofil implementiert, welches sich mit einer Länge von 3 Stunden und 45 Minuten an einem Versuchstag zweimal wiederholen lässt. Abbildung 5.5 zeigt die eingestellte geforderte Leistung und beispielhaft die tatsächliche Kesselleistung einer Messung mit der modellbasierten Regelung. Wie bei Kleinf Feuerungsanlagen üblich, wird auf eine feste Kesseltemperatur geregelt und die Rücklauftemperatur wird vom Heizkreis und dessen Wärmeabnahme dominiert. In den vorgestellten Versuchen wurde eine regelbare Prüfstandseinheit zur Vorgabe der Rücklauftemperaturen verwendet, damit sich aus Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur, sowie konstanter Wassermassenströme eine bestimmte Temperatur ergibt.

Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse der Leistungsregelung der modellbasierten Regelung. Wie zu erwarten wird die Vorlauftemperatur T_{VL} konstant mit geringen Abweichungen auf den gewünschten 73 °C gehalten. Als Vergleich sind in Abbildung 5.7 die Vorlauftemperaturen für einen nach Nichols ausgelegten PID-Regler zu sehen. Auffällig ist, dass die Abweichung vom Sollwert der Vorlauftemperatur deutlich größer als bei der MBR sind und dass typische Effekte wie das Über- (nach 1,5 h) und Unterschwingen (nach 2 h 45 min) der Vorlauftemperatur bei Änderung der Leistung auftreten.

Die Abbildungen 5.8 und 5.9 zeigen die Gaskonzentrationen für die Reglerkonfigurationen MBR, CO-O₂-MBR über den Versuchszeitraum. Beide Regler weisen ähnliche Sauerstoffverläufe über dem Leistungsprofil auf. Wie zu erwarten, erfordert Schwachlast bei beiden Konfigurationen höhere Sauerstoffkonzentrationen¹. Während in der MBR dies leistungsabhängig vorimplementiert ist, lernt der Regler CO-O₂-MBR diese Eigenschaft in Echtzeit. Wie an den Mittelwerten der Sauerstoffkonzentration von $\bar{c}_{O_2,MBR} = 8,7 \text{ Vol.} - \%$ und $\bar{c}_{O_2,CO-O_2-MBR} = 8,2 \text{ Vol.} - \%$ deutlich wird, kann die Reglerkonfiguration CO-O₂-MBR die Sauerstoffkonzentration im Mittel um $\approx 0,5 \text{ Vol.} - \%$ reduzieren. Während bei Volllast ($\approx 27 \text{ kW}$) und Schwachlast ($\approx 10 \text{ kW}$) die Sauerstoffkonzentrationen ähnlich sind, hat der CO- λ -Schätzer vor allem bei Teillast die Sauerstoffkonzentration um fast 1 Vol. – % gesenkt. Die Standardabweichung der beiden Regelkreise ist mit $\sigma_{O_2,MBR} = 1,7 \text{ Vol.} - \%$ und $\sigma_{O_2,CO-O_2-MBR} = 1,7 \text{ Vol.} - \%$ erwartungsgemäß nahezu identisch, da zweimal der gleiche Sauerstoffregler verwendet wurde. In den Experimenten konnten die CO-Emissionen von durchschnittlich $\bar{c}_{CO,MBR} = 497 \text{ mg m}^{-3}$ auf $\bar{c}_{CO,CO-O_2-MBR} = 365 \text{ mg m}^{-3}$ durch die CO-O₂-Schätzer reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion um 27 %. Es wird erwartet, dass in der Praxis die Reduktion noch deutlicher ausfallen wird, da hier keine

1 Höhere Leistungen erfordern im Allgemeinen geringere Luftzahlen, da die Durchmischung deutlich besser ist.

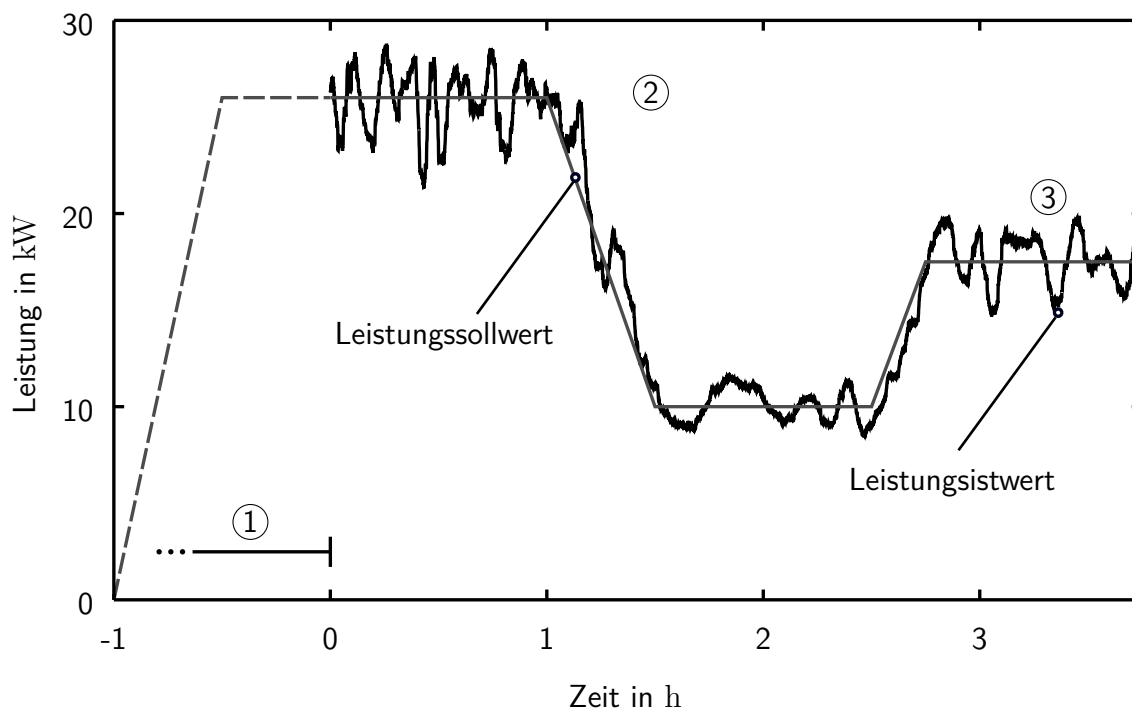


Bild 5.5: Gewähltes Lastprofil mit Einschwingphase ①, halbstündiger Rampe von Volllast auf Schwachlast ② und viertelstündiger Rampe auf Teillast ③. Die modellbasierte Regelung ist in der Lage sehr präzise die Kesselleistung der Feuerung einzustellen.

zuvor hoch optimierten Sauerstoffwerte für verschiedene Leistungen verwendet werden, wie es der Fall in diesen Experimenten war. In Tabelle 5.1 sind die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und vergleichend den Ergebnisse der CO-O₂-PID-Konfiguration gegenübergestellt. Ähnlich wie bereits beim CO-O₂-MBR, kann sowohl die O₂-Konzentration ($\downarrow 1,2$ Vol. – %), als auch die CO-Konzentration ($\downarrow 87$ mg/m³) mittels des kohlenmonoxid-basierten Konzeptes gesenkt werden. Die Ergebnisse in der Tabelle zeigen auch, dass sich das kohlenmonoxid-basierte Konzept mit verschiedenen Sauerstoffreglern kombinieren lässt und dabei vergleichbare Ergebnisse (für MBR und PID) liefert.

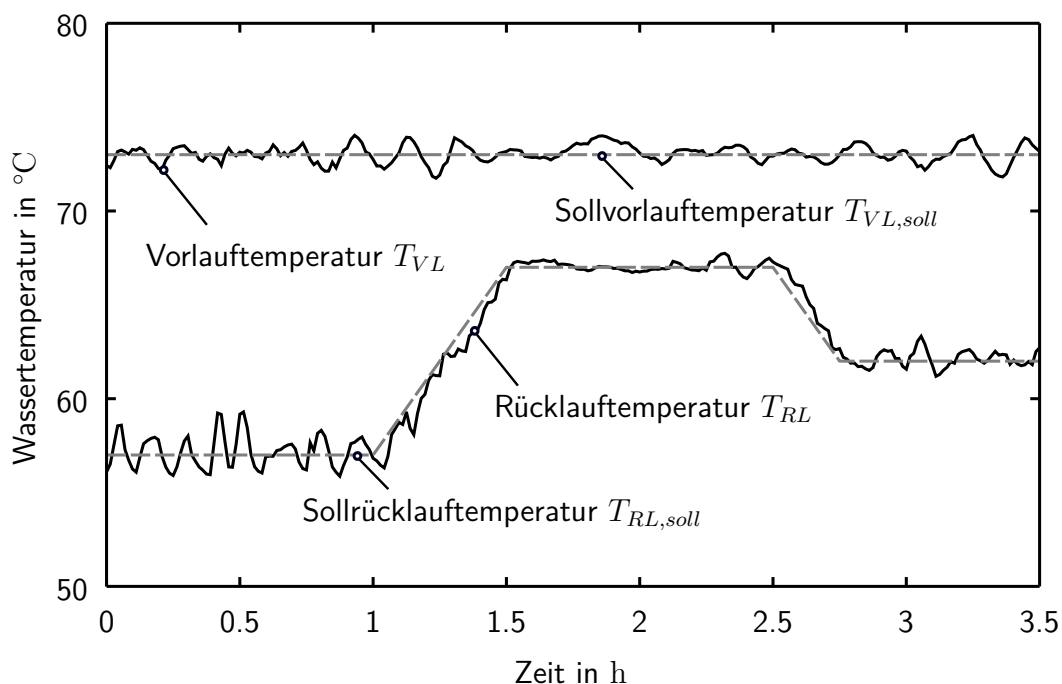


Bild 5.6: Vor- und Rücklauftemperatur mit der Reglerkonfiguration MBR. Da der CO- λ -Schätzer einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Leistung hat, sehen die Ergebnisse für die Reglerkonfiguration CO- λ -MBR vergleichbar aus.

Tab. 5.1: Ergebnisse der Experimente mit Lastzyklen (alle Werte bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol. – % O₂).

Größe		Einheit	MBR	CO-O ₂ -MBR	CO-O ₂ -PID
$c_{\text{O}_2, \text{RGA}}$	Mittelwert	Vol. – %	8,6	8,2	7,4
	Mittelwert VL	Vol. – %	6,9	7,1	7,1
	Mittelwert TL _{60%}	Vol. – %	8,6	7,3	7,2
	Mittelwert TL _{30%}	Vol. – %	10,3	9,4	8,1
	Standardabw.	Vol. – %	1,1	1,4	1,1
$c_{\text{CO}, \text{RGA}}$	Mittelwert	mg m ⁻³	507	369	420
	Mittelwert VL	mg m ⁻³	205	89	83
	Mittelwert TL _{60%}	mg m ⁻³	332	248	363
	Mittelwert TL _{30%}	mg m ⁻³	929	751	980
T_{VL}	Standardabw.	°C	0,5	0,5	1,7
$w_{\text{H}_2\text{O}, \text{Brst}}$		Gew.-% OS.	35,8	35,6	34,7

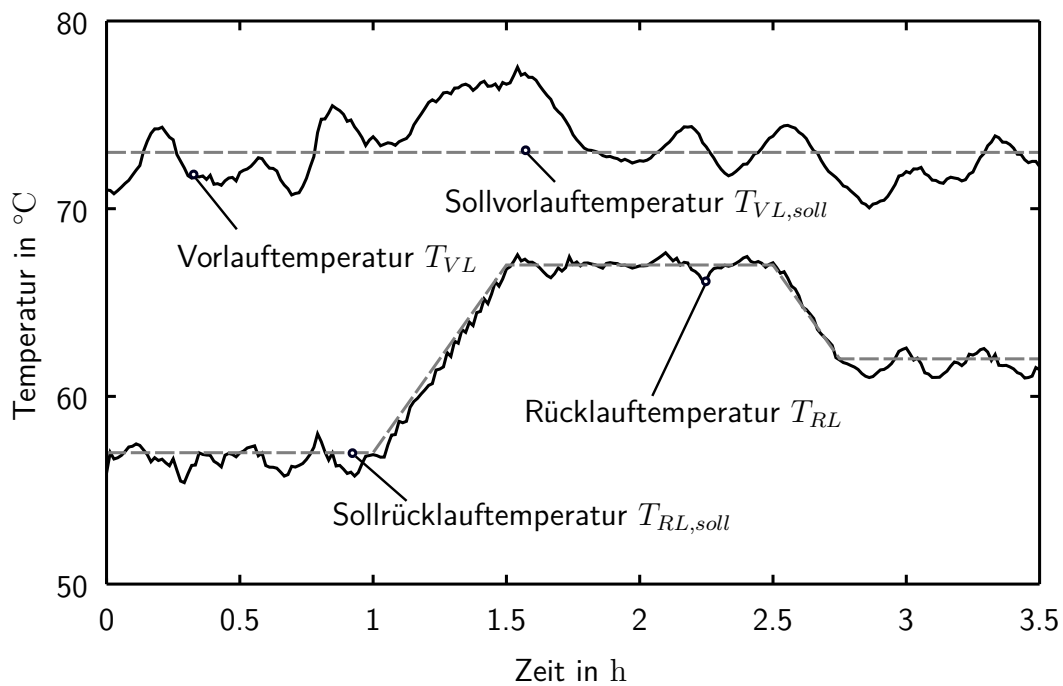


Bild 5.7: Vor- und Rücklauftemperatur mit der Reglerkonfiguration PID. Da der CO- λ -Schätzer einen zu vernachlässigenden Einfluss auf die Leistung hat, sehen die Ergebnisse für die Reglerkonfiguration CO- λ -MBR vergleichbar aus.

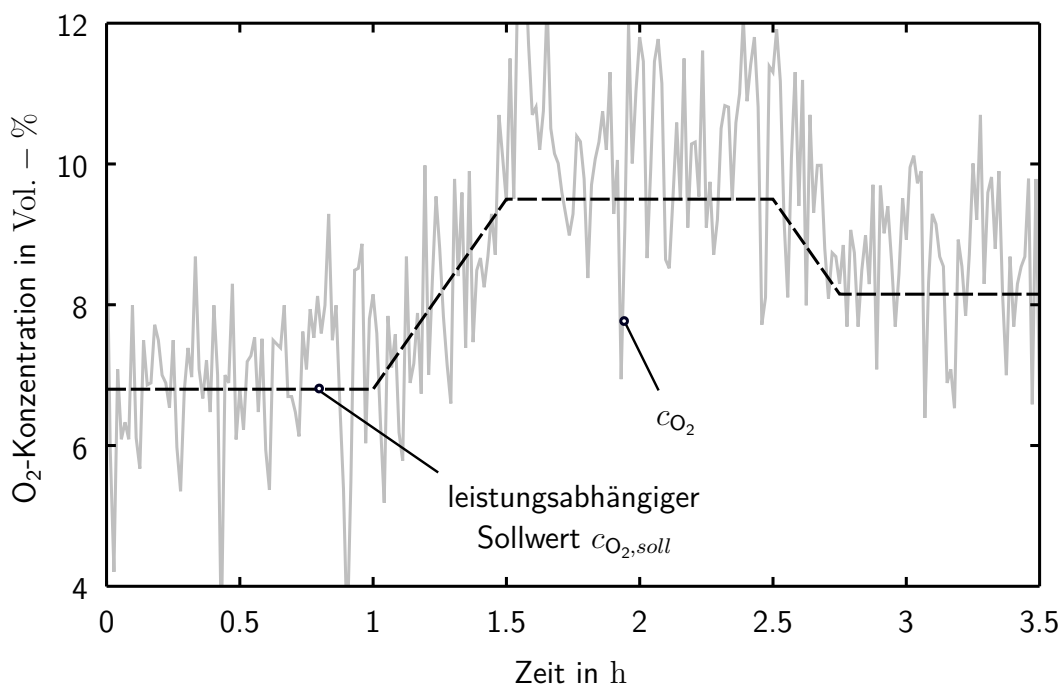


Bild 5.8: Reglerverhalten in Reglerkonfiguration MBR. In der Abbildung sind die Mittelwerte, der vom Regler vorgegebene optimale Sollwert und die tatsächliche Sauerstoffkonzentration dargestellt.

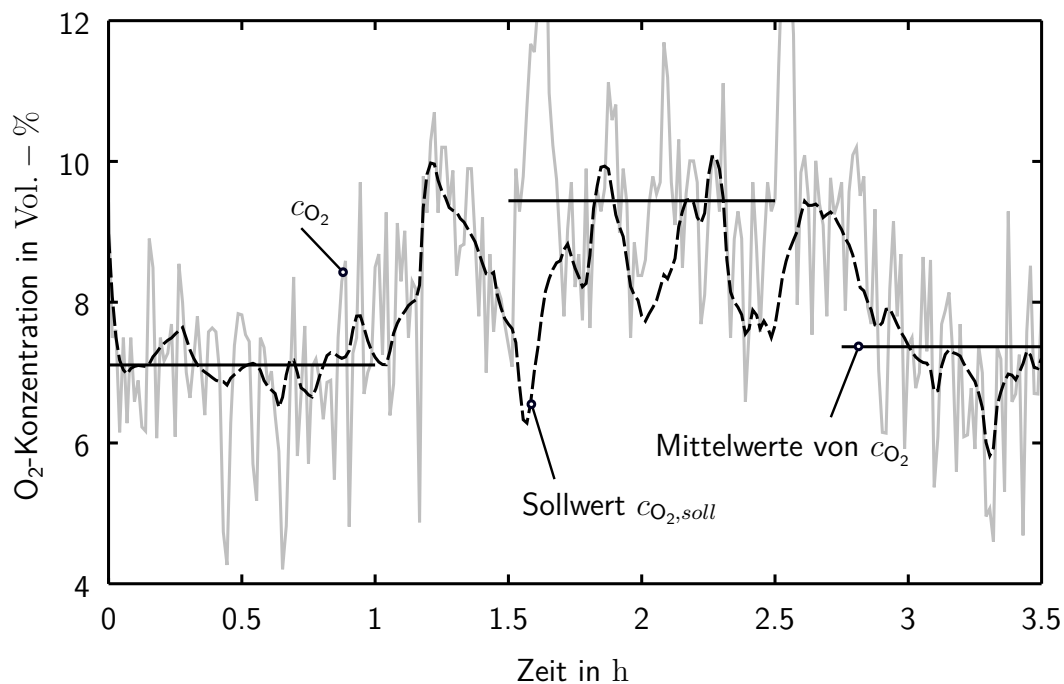


Bild 5.9: Reglerverhalten in Reglerkonfiguration CO- λ -MBR. In der Abbildung sind die Mittelwerte, der vom Regler vorgegebene optimale Sollwert und die tatsächliche Sauerstoffkonzentration dargestellt.

Zusammenfassung der Ergebnisse mit Lastzyklen:

- Die Leistungsregelung der MBR ist der einfachen PID-Regelung deutlich überlegen.
- Der CO-O₂-Schätzer ist in der Lage die optimale Sauerstoffkonzentration für verschiedene Leistungen zu bestimmen. Die Regelung ist in der Lage typischen Lastzyklen zu folgen.
- Der CO-O₂-Schätzer bewirkt sowohl in der CO-O₂-PID- als in der CO-O₂-MBR-Konfiguration eine deutliche Reduktion der CO-Emissionen. Dies ist besonders beachtenswert unter dem Gesichtspunkt, dass die Sauerstoffkonzentrationen der MBR bereits aufwendig optimiert wurden.
- Die CO-Emissionen konnten um 27% durch den Schätzer reduziert werden. Die Anlage konnte mit einem tieferen Sauerstoffgehalt betrieben werden und erreicht dadurch erhöhte Wirkungsgrade.

5.2.3 Eintrag von Falschlufft

Kleinfeuerungsanlagen haben in vielen Fällen einen erheblichen Anteil an Falschlufft. Dies liegt mitunter am Brennstoffein- und Ascheaustrag, welcher meist über Schneckenförderungen realisiert ist. Diese sind nur schwer vollständig abzudichten und meist sind zusätzliche Einrichtungen, wie beispielsweise Zellradschleusen oder dichte Aschebehälter notwendig. Weitere Falschlufftquellen sind typischerweise Brennraumtüren, welche unzureichend abgedichtet sind oder deren Dichtungen durch thermische Einflüsse korrodieren. Die Menge an Falschlufft, welche sich bis ans Ende des Kessels kumuliert hat, ist in vielen Fällen nicht bekannt, stark druckabhängig und kann sich zudem mit der Zeit verändern. In den folgenden Experimenten soll das Verhalten des CO- λ -Reglers bei Zugabe „künstlicher“ Falschlufft gezeigt werden.

Über eine Öffnung kann in das Ascheaustragungssystem der Feuerung Falschlufft vor dem Wärmetauscher hinzugegeben werden (siehe Abbildung auch 3.2). Über eine Gasuhr wird der hinzugegebene Volumenstrom gemessen. Vom zusätzlich hinzugegebenen Sauerstoff kann ausgegangen werden, dass dieser nicht mehr an der Redox-Reaktion teilnimmt und daher zu hundert Prozent als Falschlufft wirkt.

Abbildung 5.10 zeigt die Ergebnisse in der CO-O₂-PID-Konfiguration. Als Brennstoff wurde feuchter Brennstoff (Hackschnitzel 42 Gew. – %OS.) durchschnittlicher Qualität verwendet. Die Feuerung wurde leistungsgeregelt auf 75 % der Volllast betrieben (23 kW). Nach einer Stunde Versuchszeit wurde ein Massenstrom von 5 m³ h⁻¹ in das Ascheaustragungssystem des Wärmetauschers eingebracht. Dies hat zur Folge, dass sich die Konzentration des Sauerstoffgehaltes erhöht, obwohl die tatsächlich an der Verbrennung teilnehmende Sauerstoffmenge identisch bleibt. Die Zugabe von Falschlufft führt also zu einer Rechtsverschiebung der CO- λ -Charakteristik, da die optimale Sauerstoffkonzentration λ_{opt} nun an der Stelle $\lambda_{opt} + \lambda_{Falschlufft}$ liegt. Die in Abbildung 5.10 und 5.11 eingezeichneten Mittelwerte über die erste und zweite Versuchsstunde, verdeutlichen den Anstieg der geschätzten optimalen Sauerstoffkonzentration. Ein Anstieg von 7,0 Vol. – % auf 8,0 Vol. – % konnte beobachtet werden und dies entspricht dem aus der Verbrennungsrechnung errechneten Anstieg von 1,0 Vol. – % (bei 23 kW Leistung, 35 Gew. – %OS. Brennstoffwassergehalt). Vergleichend wurde derselbe Versuch auch ohne CO- λ -Schätzer bei einer O₂-Sollkonzentration von 7,6 Vol. – % gefahren. In Tabelle 5.2 werden die Ergebnisse beider Versuche gegenübergestellt. Die Kohlenmonoxidkonzentration ist durch die CO-O₂-Schätzung um 21 % reduziert worden (von 480 mg m⁻³ auf 378 mg m⁻³). Die mittlere Sauerstoffkonzentration bleibt nahezu identisch.

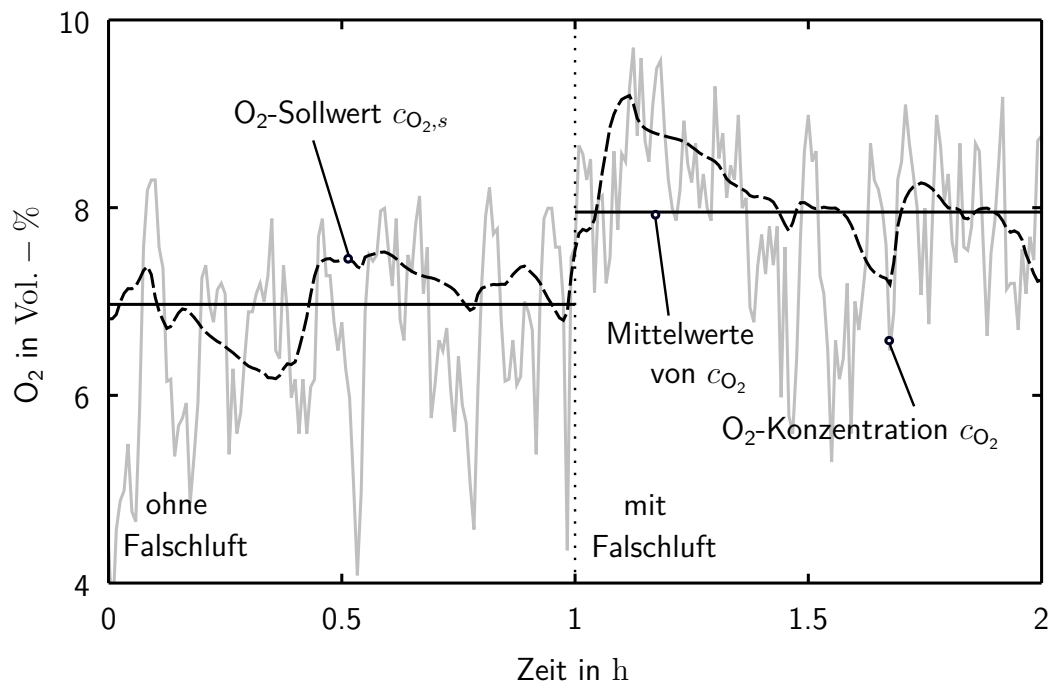


Bild 5.10: Hinzugabe von Falschluff ($5 \text{ m}^3/\text{h}$) nach einer Versuchszeit von einer Stunde. Der Mittelwert der geschätzten optimalen Sauerstoffkonzentration steigt von $7,0 \text{ Vol.} - \%$ auf $8,0 \text{ Vol.} - \%$

Tab. 5.2: Versuchsexperimente unter Zugabe von Falschluff. Mittelwert über 30 min vor bis 30 min nach Falschluffzugabe.

Größe		Einheit	CO- λ -PID	PID
$r_{\text{O}_2, \text{RGA}}$	Mittelwert	Vol. - %	7,2	7,2
	Standardabw.	Vol. - %	1,0	1,2
$r_{\text{CO}, \text{RGA}}$	Mittelwert	mg m^{-3}	249	480
T_{VL}	Standardabw.	$^{\circ}\text{C}$	1,1	1,7
\dot{Q}	Mittelwert	kW	25,4	25,6
$w_{\text{H}_2\text{O}, \text{Brst}}$		Gew.-% OS.	40,8	40,8

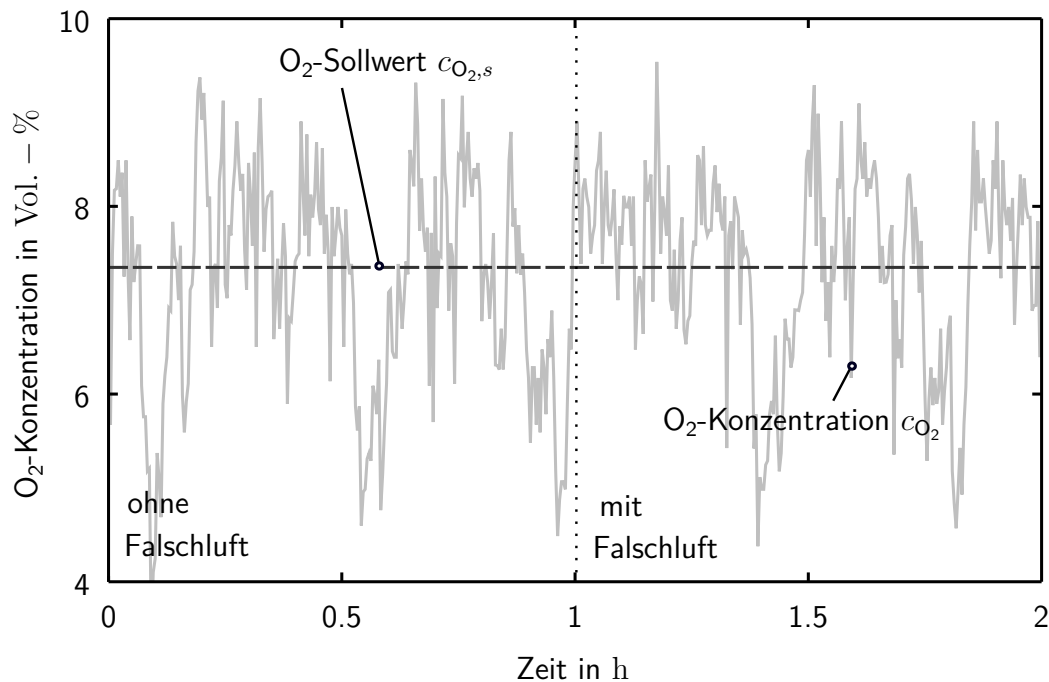


Bild 5.11: Hinzugabe von Falschluff ($5 \text{ m}^3/\text{h}$) nach einer Versuchszeit von 1 h ohne Verwendung des CO-O₂-Schätzers. Die Sauerstoffsollkonzentration liegt konstant bei 7,6 Vol. – %.

Zusammenfassung der Ergebnisse mit Falschluff:

- Der CO-O₂-Schätzer passt die Sauerstoffkonzentration unter Einfluss von Falschluff neu an.
- Bei gleicher mittlerer Sauerstoffkonzentration und Zugabe von $5 \text{ m}^3/\text{h}$ Falschluff (entspricht einem Falschluffanteil von circa 10%) wird die CO-Konzentration durch den CO-O₂-Schätzer um 48 % reduziert.

5.2.4 Änderung des Brennstoffwassergehaltes

Eine weitere, häufig auftretende Störung, welche untersucht wird, ist die Änderung der Brennstofffeuchte. Unter praxisüblichen Bedingungen schwankt die Brennstofffeuchte sowohl zwischen verschiedenen Brennstofflieferungen, als auch innerhalb einer Schüttung selbst. Während beispielsweise gut durchlüftete Regionen einer Schüttung innerhalb weniger Tage trocknen, befinden sich in den zentralen und damit weniger belüfteten Regionen der Schüttung Brennstofffeuchten, welche um mehrere Massenprozent höher liegen können. Um dies am Prüfstand zu simulieren, sind drei Brennstoffe mit unterschiedlichen

Brennstoffwassergehalten vorbereitet worden. Es wurde Hackgut ($w_1 \approx 35$ Gew. – %OS.) bei Temperaturen von circa 25 °C für 24 h auf einen resultierenden Brennstoffwassergehalt ($w_2 \approx 18$ Gew. – %OS.) getrocknet, sowie für 72 h befeuchtet (resultierender Brennstoffwassergehalt lag bei $w_3 \approx 45$ Gew. – %OS.). Die Anlage wurde in den Versuchen eine Stunde stationär bei 27,2 KW mit Hackschnitzeln der Feuchte w_1 betrieben. Nach dieser Stunde erfolgte ein Brennstoffwechsel auf die trockeneren Hackschnitzel mit w_2 und nach einer weiteren Stunde der Wechsel zu den sehr feuchten Hackschnitzel mit Brennstofffeuchte w_3 .

Im Allgemeinen sorgen höhere Brennstofffeuchten zu einer höheren Sensibilität bezüglich zu hoher Sauerstoffkonzentrationen, da die adiabate Verbrennungstemperatur bereits durch das zusätzliche zu verdampfende Wasser tiefer liegt. Bei den Versuchen konnte ein weiterer dominanter Einflussfaktor festgestellt werden. Da die Sensorik immer in feuchtem Abgas eingesetzt wird, stellt das zusätzliche Einbringen von Wasser eine Verdünnung des Sauerstoffgehaltes dar. Die feuchte Sauerstoffkonzentration fällt daher mit steigenden Brennstoffwassergehalten, während die trockene Sauerstoffkonzentration näherungsweise konstant bleibt (bei gleicher Leistung). Abbildung 5.14 zeigt den prozentualen Messunterschied zwischen der Rauchgasanalytik und der KS1D-Sonde. Eine Korrelation zwischen dem Brennstoffwassergehalt und dem Messunterschied ist deutlich zu erkennen. Hohe Brennstoffwassergehalte sorgen bei gleicher Leistung und gleichem Luftmassenstrom zu einer Absenkung des prozentualen Sauerstoffgehaltes, welchen die Lambdasonde misst. Da jedoch die optimale trockene Sauerstoffkonzentration für viele Anlagen näherungsweise konstant bleibt (die CO- λ -Charakteristik verschiebt sich durch Änderung der Brennstofffeuchte tendenziell horizontal), sinkt die optimale feuchte Sauerstoffkonzentration.

Der beschriebene Versuch wurde ausschließlich mit der CO-O₂-Regelung durchgeführt. Grund hierfür ist, dass der Brennstoffwechsel mit zahlreichen Fehlern behaftet ist und sich der genaue Zeitpunkt des Wechsels erst nach Auswertung der Brennstoffproben bestimmen lässt. Die Vermischung im Tagesbehälter und in der Brennstoffschnecke ließen sich nicht vermeiden. Ein direkter Vergleich der Versuche mit und ohne CO-O₂-Schätzer wäre daher nur eingeschränkt möglich. Wir wollen uns daher auf eine qualitative Bewertung der Ergebnisse konzentrieren. Abbildung 5.12 zeigt die optimale Sauerstoffkonzentration, die vom CO-O₂-Schätzer über die Versuchsdauer geschätzt wurde. Zusätzlich sind die Mittelwerte der Schätzung dargestellt. Wie an den gemittelten Sauerstoffkonzentrationen zu erkennen ist, hebt sich der optimale feuchte Sauerstoffgehalt beim Wechsel von normalen (w_1) auf trockenen Brennstoff (w_2) von 7,5 Vol. – % auf 8,2 Vol. – %. Nach zwei weiteren Versuchsstunden (wenn der Brennstoffwassergehalt auf $w_3 \approx 45$ Gew. – %OS. variiert wird), schätzt der CO-O₂-Regler für diese Brennstofffeuchte eine optimale Sauerstoffkonzentration von 7,4 Vol. – %. Dies stimmt mit den beiden bereits formulierten Vermutungen überein, dass die kühlere Verbrennung sensibler auf hohe λ -Werte reagiert

und die zusätzliche Feuchtigkeit die optimale feuchte Sauerstoffkonzentration verschiebt. Eine eindeutige Trennung dieser beider Effekte ist mit dem beschriebenen Versuch nicht möglich. Abbildung 5.13 zeigt die resultierenden CO-Emissionen unter den vorgegeben Sollwerten. Wie deutlich zu sehen, kann auch der CO- λ -Regler die CO-Emissionen für feuchte Brennstoffe nicht auf dem niedrigen Niveau des trockenen Brennstoffes halten. Wie an den teils sehr hohen CO-Konzentrationen in Abbildung 5.13 zu erkennen ist, ist die Feuerung nur eingeschränkt fähig derart feuchte Brennstoffe (selbst mit CO-O₂-Schätzer) emissionsarm zu verfeuern.

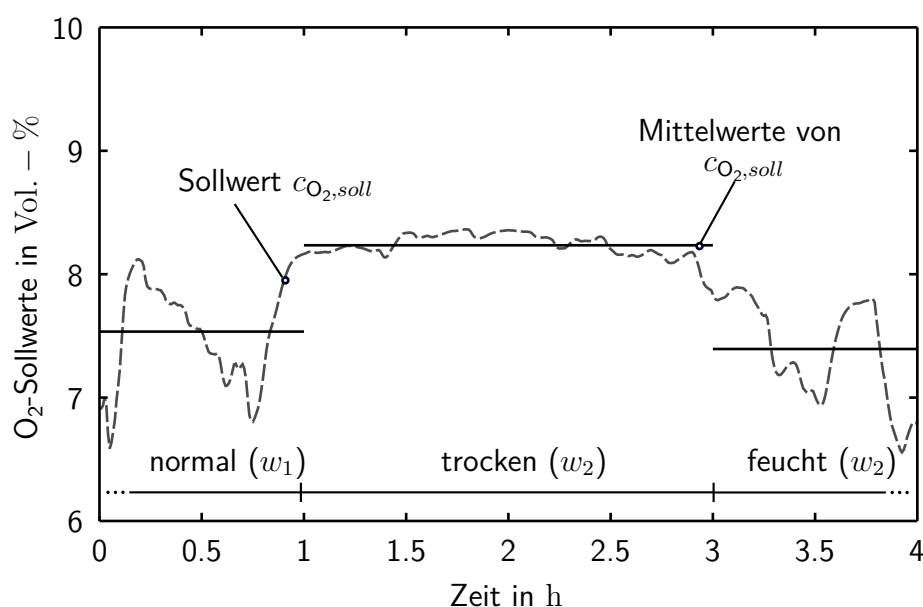


Bild 5.12: O₂-Emissionen bei Änderung der Brennstofffeuchte mit eingeschaltetem CO-O₂-Schätzer.

Zusammenfassend ließ sich an dem beschriebenen Versuch zeigen, dass ein CO-O₂-Regelkreis Vorteile aufweist, wenn die Feuerung mit verschiedenen feuchten Brennstoffen betrieben wird. Da die optimale (feuchte) Sauerstoffkonzentration über die Zeit variiert, kann eine Feuerung ohne den CO- λ -Schätzer nicht – ohne genaue Kenntnis des Brennstoffwassergehaltes – emissionsoptimal betrieben werden. Der CO-O₂-Schätzer ermöglicht, unabhängig vom Brennstoffwassergehalt die Feuerung mit der optimalen Sauerstoffkonzentration zu betreiben. Dies ist für Hackschnitzelfeuerungen mit stark wechselnder Brennstoffqualität ein gewichtiger Vorteil.

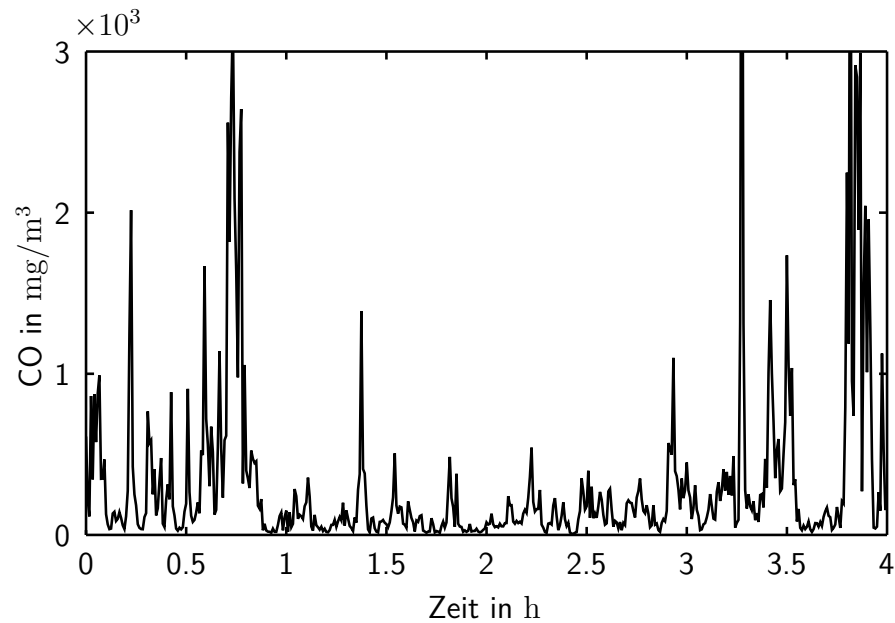


Bild 5.13: CO-Emissionen bei Änderung der Brennstofffeuchte mit eingeschaltetem CO-O₂-Schätzer.

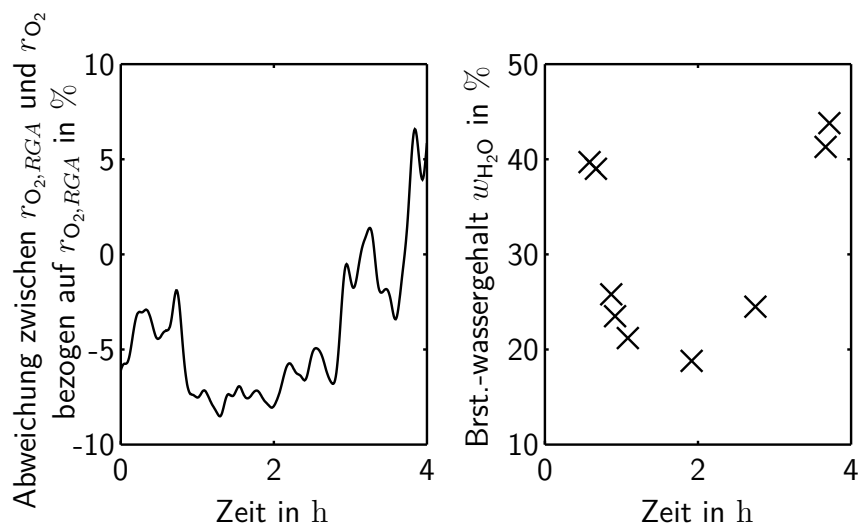


Bild 5.14: Abweichung zwischen feuchter und trockener Sauerstoffmenge bezogen auf die trockene Sauerstoffkonzentration. Ein Ausreißer wurde entfernt.

Zusammenfassung der Ergebnisse mit versch. Brennstofffeuchten:

- Der CO-O₂-Schätzer passt die Sauerstoffkonzentration bei wechselnden Brennstoffwassergehalten neu an.
- Sowohl Effekte wie die Verdünnung des Abgases, als auch Änderung der Verbrennungsbedingungen können mit dem CO-O₂-Schätzer kompensiert werden.

5.2.5 Sensordrift

Wie in den vorhergehenden Kapiteln bereits mehrfach betont, stellt der langfristige Drift der λ -Sonde ein wichtiges Problem für Kleinf Feuerungsanlagen dar. Bei dieser Problematik sind deutliche Vorteile durch den CO-O₂-Schätzer zu erwarten, denn der Sauerstoffsollwert wird durch den Schätzer fortlaufend korrigiert.

Um gezielt die Funktionsweise des Reglers bei driftendem Sensor nachzuweisen, wurden Versuche mit synthetischem Sensoroffset gefahren. Hierbei wurde softwareseitig ein Drift des Sensors generiert. Zu dem tatsächlich gemessenen Sensorsignal wurde der in Abbildung 5.15 gezeigte Offset addiert. In den ersten 30 min entspricht das Sauerstoffsignal der Lambdasonde genau¹ der tatsächlichen feuchten Sauerstoffkonzentration im Abgas. Nach diesen 30 min wird über eine Stunde kontinuierlich der Offset auf -3 Vol. – % erniedrigt. Anschaulich bedeutet das, dass eine tatsächliche Sauerstoffkonzentration von beispielsweise 8 Vol. – % nun für die Regelung/Steuerung „aussähe“ wie eine Sauerstoffkonzentration von 5 Vol. – %. Die Sauerstoffregelung ohne CO-O₂-Schätzer würde damit also auf einem falschen Sauerstoffgehalt regeln. Ein Offset von 3 Vol. – % ist als *worst-case*-Scenario zu sehen. In der Praxis sind nach einem Jahresbetrieb ohne Nachkalibrierung und Reinigung eher Offsets in der Größenordnung 0,5 Vol. – % bis 1,5 Vol. – % zu erwarten². Die Versuche zur Validierung wurden mit einer Leistung von circa 16 kW und einer durchschnittlichen Brennstofffeuchte von 35 Gew. – %OS. durchgeführt. Teillast wurde gewählt, um die Feuerung mit hohen Sauerstoffkonzentrationen zu betreiben, ohne die obere Leistungsgrenze des Sekundärluftgebläses zu erreichen. Außerdem ist bei geringer Last die Auswirkung der erhöhten Sauerstoffkonzentrationen deutlicher in den CO-Emissionen zu erkennen.

Abbildung 5.17 zeigt nun die Sauerstoff- und CO-Konzentrationen für die modellbasierte Regelung ohne den CO-O₂-Schätzer. Ein zuvor festgelegter und optimierter Sollwert von 10,5 Vol. – % wurde für den Versuch verwendet (oben). Zusätzlich ist noch die fiktive

1 „Genau“ im Rahmen der Messgenauigkeit der Lambdasonde.

2 Der Sensoroffset ist von zahlreichen Parametern abhängig. Wichtige Einflussgrößen sind Betriebsdauer, durchschnittliche Staubbelastung im Abgas, Messposition, Sensorprinzip und natürlich auch Hersteller des Sensors.

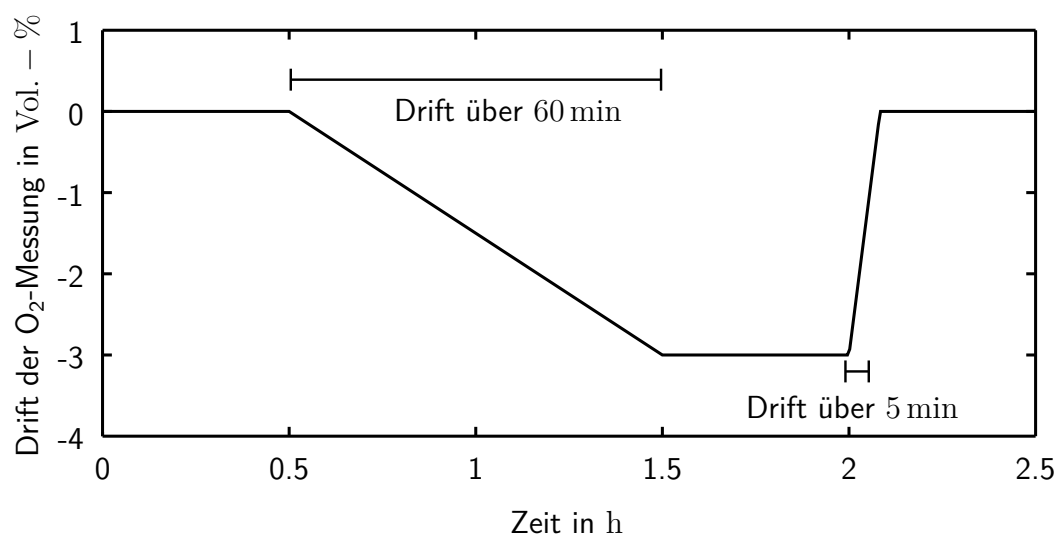


Bild 5.15: Sensordrift über die Zeit

Kurve zu erkennen, wie sich eine tatsächliche Sauerstoffkonzentration von 10,5 Vol. – % durch den Drift der λ -Sonde im Sensorsignal verändern würde. Betrachtet werden nun die Ergebnisse für die Sauerstoffkonzentrationen (mitte). Wie zu erwarten, wird die Sauerstoffkonzentration c_{O_2} vom Sauerstoffregler auf einem konstanten Wert gehalten. Da der CO-O₂-Schätzer nicht aktiviert ist, findet keine Korrektur des Sollwertes statt. Dies hat zur Folge, dass sich die tatsächliche Sauerstoffkonzentration gemäß des vorgebenden Offsets erhöht. Im hier dargestellten Experiment erreicht die tatsächliche Sauerstoffkonzentration $c_{O_2, RGA}$ Werte von über 15 Vol. – % und ist damit natürlich weit von der optimalen Sauerstoffkonzentration entfernt. Als Folge treten stark erhöhte CO-Emissionen (unten) auf, wenn die Sauerstoffkonzentration Werte über 13 Vol. – % erreicht. Zusammenfassend zeigt das Experiment, dass reine Sauerstoffregler anfällig auf den Drift der Lambdasonde reagieren und sich dadurch stark erhöhte Emissionen durch driftende Sauerstoffwerte ergeben.

Abbildung 5.17 zeigt nun die vergleichenden Ergebnisse für das identische Experiment jedoch mit eingeschaltetem CO-O₂-Schätzer. Im oberen Drittel der Abbildung ist die O₂-Sollkonzentration des Schätzers sowie die fiktive Sauerstoffkonzentration von 10,5 Vol. – % zur Orientierung eingezeichnet. Klar zu erkennen ist, dass der Sollwert des Schätzers der fiktiven Sauerstoffkonzentration von 10,5 Vol. – % über den Drift hinweg folgt. Der Schätzer erkennt, dass sich die optimale O₂-Konzentration durch den Drift der Sonde verschoben hat und passt seine Schätzung entsprechend an. Ebenfalls deutlich wird, dass bei einer sprungförmigen Änderung des Offsets ($t = 2$ h), ein gewisser zeitlicher Versatz (Größenordnung 10 min) auftritt. Dieser zeitliche Versatz hat mehrere Gründe. Zum einen treten genau nach 2 h auffällig geringe CO-Emissionen auf, die den Schätzer natürlich

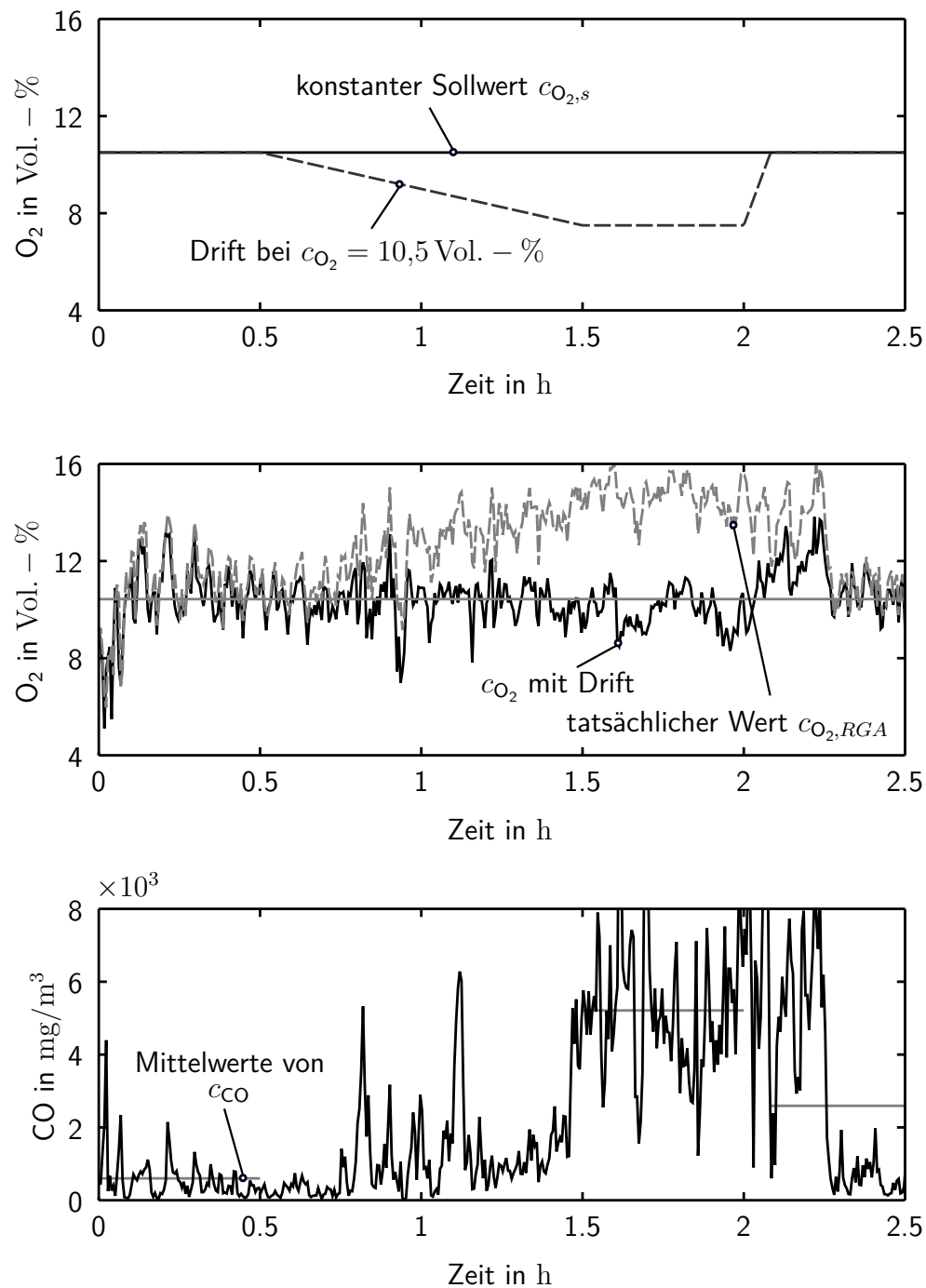


Bild 5.16: Ergebnisse aus den Versuchen mit künstlichen Sensordrift ohne CO- λ -Regler. (oben) Geschätzter optimaler Sollwert und Drift bei 10,5 Vol. - % . (mitte) Sauerstoffkonzentration mit und ohne Drift. (unten) CO-Emissionen und Mittelwerte über die Bereiche ohne Driftänderung.

dazu „verleiten“, die aktuelle Sauerstoffkonzentration positiv zu bewerten und daher auch den optimalen Sollwert nicht zu verschieben. Des Weiteren ist für einen längeren Zeitraum die optimale Sauerstoffkonzentration konstant geblieben und der Kalmanfilter konvergiert. Eine Änderung der CO-O₂-Charakteristik wird bei konvergiertem Kalmanfilter tendenziell als stochastischer Ausreißer interpretiert und erst nach einiger Zeit verändert sich die Schätzung der CO-O₂-Charakteristik. Im selben Diagramm (Mitte) ist zu erkennen, dass der Schätzer nun die tatsächliche Sauerstoffkonzentration nahezu ideal konstant hält, ohne dass die tatsächliche Sauerstoffkonzentration für ihn bekannt ist. Der CO-O₂-Schätzer ist also in der Lage, die tatsächliche Sauerstoffkonzentration auf dem optimalen Niveau zu halten, auch wenn die Sauerstoffmessung, die ihm zur Verfügung steht, über die Zeit vom wahren Wert wegdriftet. Dies stellt einen wichtigen Vorteil für die Regelung mit einem CO-O₂-Schätzer dar. Werden nun die CO-Emissionen für den gesamten Versuch miteinander verglichen, stellt sich heraus, dass ein Offset der Lambdasonde ohne den Schätzer zu deutlich erhöhten Emissionen führt (2292 mg m⁻³), während der Schätzer die Emissionen konstant niedrig bei 439 mg m⁻³ hält. Dies entspricht einer Schadstoffreduktion von circa 80 %.

Tab. 5.3: Versuchsbedingungen und -ergebnisse für künstlichen Sensordrift (alle Werte bezogen auf trockenes Rauchgas und 13 Vol. – % O₂).

Größe		Einheit	MBR	CO-O ₂ -MBR	CO-O ₂ -PID
$c_{\text{CO}_2, \text{RGA}}$	Mittelwert	Vol. – %	11,7	10,6	9,0
	Standardabw.	Vol. – %	1,4	1,7	1,3
$r_{\text{CO}, \text{RGA}}$	Mittelwert	mg m ⁻³	2292	439	353
$r_{\text{CO}, \text{drift}}$	Mittelwert	mg m ⁻³	5211	481	617
T_{VL}	Standardabw.	°C	0,4	0,5	0,7
\dot{Q}	Mittelwert	kW	16,1	16,1	16,5
$w_{\text{H}_2\text{O}, \text{Brst}}$		Gew.-% OS.	35,3	-	-
$w_{\text{H}_2\text{O}}^-$	35 %	35 %	35 %		

Zusammenfassung der Ergebnisse mit Sensordrift:

- Der CO-O₂-Schätzer kompensiert Sensordrift induzierte Verschiebungen der optimalen Sauerstoffkonzentration.
- Sowohl kurzfristige, als auch langfristige Änderungen des Sensordrift können durch den CO-O₂-Schätzer ausgeglichen werden.

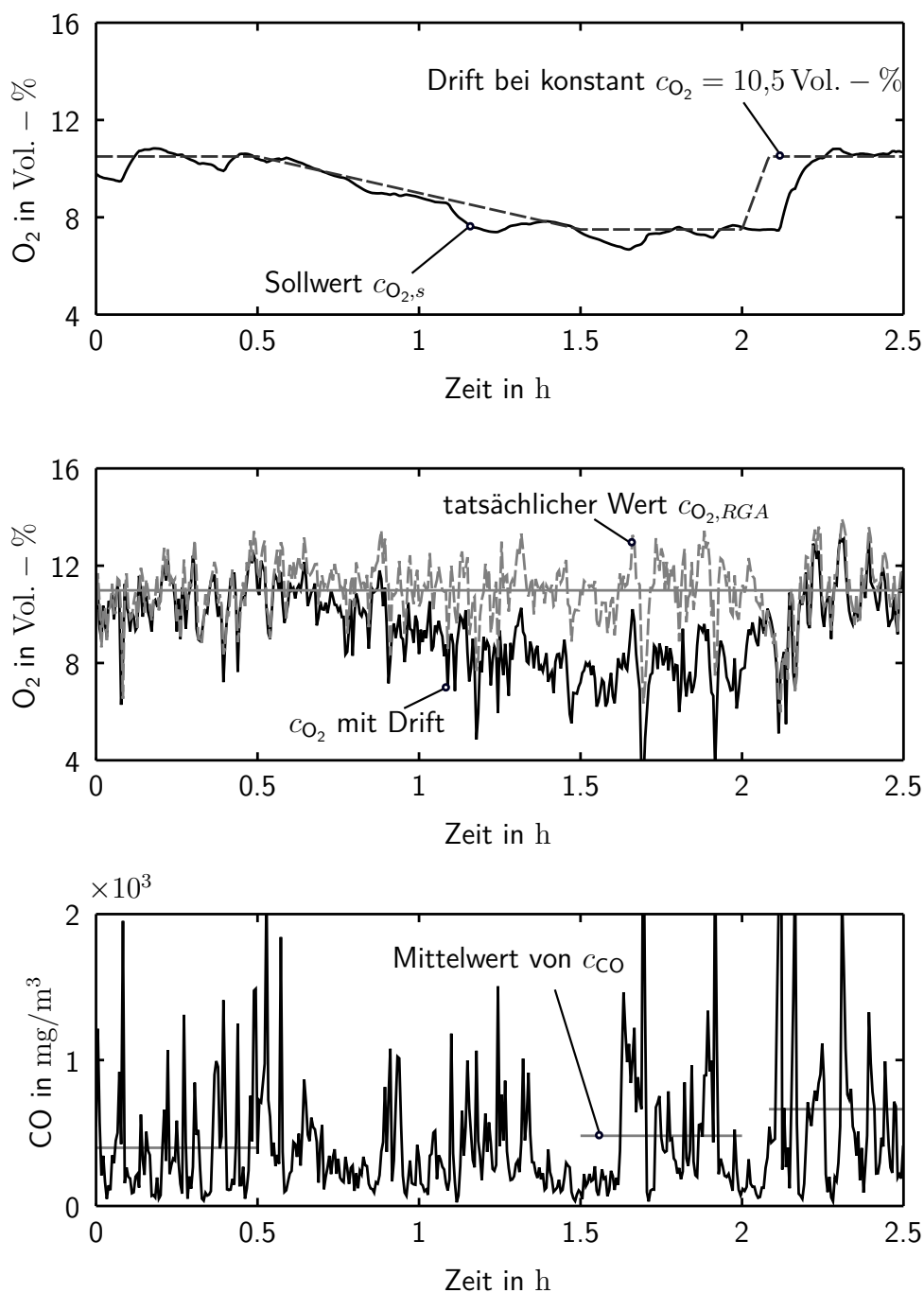


Bild 5.17: Ergebnisse aus den Versuchen mit künstlichen Sensordrift. (oben) Geschätzter optimaler Sollwert und Drift bei 10,5 Vol. - % (mitte) O₂-Konzentration mit und ohne Drift. (unten) CO-Emissionen und Mittelwerte über die Bereiche ohne Driftänderung.

6 Zusammenfassung der Schlussfolgerungen

Die vorliegende Arbeit schlägt ein neuartiges Konzept zur Regelung von Biomassekleinfeuerungsanlagen vor. Dieses stellt eine Alternative zu den bisherigen sauerstoffbasierten Regelsystemen dar und verwendet insitu-CO-Sensorik, um während der Verbrennung die Qualität des Gasphasenausbrandes zu bestimmen. Diese zusätzliche Information über die Verbrennungsqualität wird anschließend zur Regelung der Feuerung mitverwendet. Die eingesetzte CO-Sensorik (vgl. Kapitel 3.1) hat sich als geeignet für den Einsatz in Biomassefeuerungen herausgestellt. Das neue Regelsystem ist in der Lage, die Anlage selbstständig in den emissionsoptimalen Arbeitspunkt zu fahren. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen wird nicht ein lokaler Gradient der CO-O₂-Charakteristik bestimmt (vgl. Stand der Technik 2.4.3), sondern die CO-O₂-Charakteristik direkt geschätzt (Kapitel 4.8). Hierfür wurde ein Kalmanfilter eingesetzt, um die Parameter einer zuvor gewählten Basisfunktion zu schätzen. Vor allem die beiden wichtigsten Eigenschaften „Robustheit“ und „Optimierungsdauer“ konnten maßgeblich im Vergleich zu bisherigen Ansätzen gesteigert werden.

Neben der detaillierten Beschreibung des neuen Konzeptes enthält die vorliegende Arbeit eine umfangreiche Validierung des Regelkonzeptes unter typisch auftretenden Störgrößen. Analysiert wurden wechselnde Wärmenachfragen (5.2.2), Sensordrift(5.2.5), eine Änderung des Brennstoffwassergehaltes (5.2.4) und Falschlufteintrag (5.2.3).

Die Experimente unter Einfluss typischer Lastzyklen zeigten, dass die Vorgabe der optimalen Sauerstoffkonzentration bei verschiedenen Leistungen durch einen CO-O₂-Regelkreis nicht mehr notwendig ist. Für jede Leistung wird in Echtzeit die optimale Sauerstoffkonzentration durch die CO-O₂-Schätzer bestimmt. Dies ermöglicht auf das Optimieren der Sauerstoffsollkonzentrationen für verschiedene Leistungen zu verzichten. Zudem weisen die Messungen nach, dass sich die CO-Emissionen im Vergleich zu Referenzmessungen ohne CO-O₂-Schätzer deutlich verbessern.

Experimente mit künstlichem Sensordrift zeigten, dass eine auftretende Verschiebung der CO-λ-Charakteristik (durch den Sensordrift) vom CO-O₂-Schätzer erkannt wird und der Sauerstoffsollwert entsprechend angepasst wird. Der Offset der Lambdasonde konnte selbst bei Abweichungen von 3 Vol. – % vollständig ausgeglichen werden. In Vergleichsmessungen ohne den Schätzer wurde gezeigt, dass dies zu einem signifikanten Anstieg der Emissionen führt. Die Experimente mit CO-O₂-Schätzer zeigten, dass die Emissionen auf einem konstanten Niveau gehalten werden können. Daraus resultiert der Vorteil, dass die

Wartungsintervalle der Lambdasonde in der Praxis deutlich reduziert werden könnten, da auch eine stark driftende Sauerstoffmessung für das CO-O₂-Regelkonzept ausreichend ist.

Um die Einflüsse von Falschlufte zu analysieren, wurden Versuche unter Eintrag von künstlicher Falschlufte durchgeführt. Ein nicht an der Verbrennung teilnehmender Luftmassenstrom wurde vor der Lambdasonde eingebracht. Dieser hat entsprechend die CO-O₂-Charakteristik in Richtung höherer Luftzahlen verschoben. Der CO-O₂-Schätzer konnte diese Verschiebung ausgleichen und zeigte daher deutlich geringere Schadstoffemissionen als Vergleichsmessungen ohne Schätzer.

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass eine Veränderung des Brennstoffwassergehaltes detektiert und die Sollsauerstoffkonzentration entsprechend durch den CO-O₂-Schätzer angepasst werden kann. Im Allgemeinen, zeichnet sich der Regelalgorithmus durch eine hohe Robustheit aus und ist in der Lage bei der Hackschnitzelanlage, Änderungen der Verbrennungsbedingungen innerhalb von 5 min bis 10 min auszugleichen. Damit stellt das neue Regelkonzept eine wertvolle Verbesserung existierender CO- λ -Regler dar. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass das CO-O₂-Regelsystem eine vielversprechende Alternative zu den klassischen sauerstoffgeführten Regelsystemen darstellt. Die Zukunft wird zeigen, ob die entstehenden Mehrkosten für die zusätzliche CO-Sensorik durch die resultierenden Verbesserungen bezüglich Wirkungsgrad und Emissionen kompensiert werden können. Eine treibende Kraft könnten hierbei zukünftige schärfere gesetzliche Emissionsrichtlinien sein. Auch der Wunsch nach einer höheren Diversität der eingesetzten Biomasse kann dafür sorgen, dass die Vorteile einer CO-O₂-Regelung noch stärker ins Gewicht fallen. Auch wenn, wie bereits angedeutet, die CO-Sensorik in den letzten Jahren deutliche technologische Fortschritte aufweist, so ist doch eine Fertigung in mittleren bis großen Stückzahlen notwendig, um die Stückkosten auf einen für Kleinfeuerungsanlagen akzeptablen Preis zu drücken. Ob dies in den nächsten Jahren geschieht, lässt sich bisher nur mutmaßen.

Forschungsbedarf besteht insbesondere in der Fragestellung, wie sich CO-Sensorik in instationären Verbrennungsprozessen (wie beispielsweise Scheitholzkesseln) einsetzen lässt und ob die formulierten Algorithmen nicht auch für Großanlagen Vorteile mit sich bringen.

Literaturverzeichnis

- [1] Kaltschmitt, M., Hartmann, H. und Hofbauer, H., Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer [2001], ISBN 3540648534.
- [2] Padinger, R., Regelungstechnik für die Hausheizung der Zukunft: Untersuchungen zur Regelung von Biomasse Feuerungen zur emissions- und effizienzoptimierten Beheizung von Wohn- und Bürobauten, Technischer Bericht, Joanneum Research, Institut für Energieforschung, Graz (AT) [2002].
- [3] Scharler, R., Obernberger, I., Längle, G. und Heinzle, J., CFD analysis of air staging and flue gas recirculation in biomass grate furnaces, 1st World Conference on Biomass and Industry, Band II:1935–1938 [2000].
- [4] Scharler, R., CFD simulation of biomass combustion plants – new developments, in IEA Bioenergy Task 32 workshop [2013].
- [5] Shiehnejadhesar, A., Schulze, K., Scharler, R. und Obernberger, I., Automatic CFD optimisation of biomass combustion plants, 20th European Biomass Conference and Exhibition, Seiten 756 – 760 [2013].
- [6] Nussbaumer, T. und Kiener, M., Moving Grate Combustion Optimisation with CFD and PIV, 21st European Biomass Conference and Exhibition, Seiten 1112 – 1117 [2013], doi:10.5071/21stEUBCE2013-2DV.3.15.
- [7] Lauber, A. und Nussbaumer, T., Charakterisierung der Partikelarten aus der Holzverbrennung und Eigenschaften in Elektroabscheidern, Holzenergie-Symposium, Band 11 [2010].
- [8] Hartmann, I., Lenz, V., Schenker, M., Thiel, C., Einicke, W.-D., Bindig, R. und Roland, U., Katalysatoruntersuchungen an einer Technikumsanlage für Biomasse-Kleinfeuerungen, Chemie Ingenieur Technik, Band 83(3):371–376 [2011], ISSN 0009286X, doi:10.1002/cite.201000106.
- [9] Kohler, H., Butschbach, P., Trautmann, T. und Zhang, X., Reduction of the toxic gas and particulate matter emissions of firewood-fueled domestic fireplaces by use of modern gas sensors , optimization of the firing process and catalytic treatment of the

- exhaust gas, energy, environment, ecosystems, development and landscape architecture [2011].
- [10] Butschbach, P., Hammer, F., Kohler, H., Potreck, A. und Trautmann, T., Extensive reduction of toxic gas emissions of firewood-fueled low power fireplaces by improved in situ gas sensorics and catalytic treatment of exhaust gas, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Band 137(1):32–41 [2009], doi:doi:10.1016/j.snb.2008.12.007.
- [11] Baumbach, G., Zuberbühler, U., Siegle, V. und Hein, K., Luftverunreinigungen aus gewerblichen und industriellen Biomasse- und Holzfeuerungen, Ecomed, Landsberg/Lech (DE) [1997], ISBN 978-3-609-69430-6.
- [12] Pfeifer, F., Struschka, M. und Baumbach, G., Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher, Umweltbundesamt, Berlin (DE) [2000].
- [13] Brodbeck, J., Glesing, D., Hammer, F., Kohler, H. und Struschka, M., Holzverbrennung 2015 - Vorstudie zur Untersuchung der Möglichkeiten zur Minimierung der Schadgas- und Feinstaubemissionen eines Stückholzkessels, Technischer Bericht, Deutsche Bundesstiftung für Umwelt (AZ-27383), Osnabrück (DE) [2010], URL https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-27383_01.pdf.
- [14] Aigenbauer, S., Moser, W. und Schmidl, C., Endbericht Neue Öfen 2020, Technischer Bericht, BIOENERGY 2020+ GmbH, Wieselburg (AT) [2011].
- [15] Kelz, J., Brunner, T. und Obernberger, I., Emission factors and chemical characterisation of fine particulate emissions from modern and old residential biomass heating systems determined for typical load, *Environmental Sciences Europe*, Seiten 1–18 [2012].
- [16] Good, J., Verbrennungsregelung bei automatischen Holzsnitzelfeuerungen, Dissertation, ETH Zürich (CHE) [1992].
- [17] Struschka, M., Winter, P., Hammer, F. und Menesklou, W., Untersuchung eines Kombisensors zur Messung von CO/HC und O₂ sowie der Abgastemperatur, Technischer Bericht, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart, Stuttgart (DE) [2014].
- [18] Brodbeck, J., Vergleichsmessungen mit Abgassensoren an Biomassefeuerungen, Technischer Bericht, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart, Stuttgart (DE) [2007].

- [19] Michel, J., Champinot, C. und Dugue, J., State of the art on emerging combustion control sensors, Sixth International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, Seiten 9–12 [2001].
- [20] Hartmann, D. H., Reisinger, K., Nothhaft, C. und Turowski, P., Kleine Biomassefeuerungen - Markttrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit, Technischer Bericht, TFZ Straubing [2010].
- [21] Nussbaumer, T., Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz [1989], doi:10.3929/ethz-a-000514834, URL <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:37724>.
- [22] Obaidullah, M., Bram, S., Verma, V. K. und Ruyck, J. D., A review on particle emissions from small scale biomass combustion, International Journal of Renewable Energy Research, Band 2(1):147–159 [2012], ISSN 1309-0127.
- [23] Baumbach, G., Struschka, M. und Heller, H., Feinstaubemissionen bei der Verbrennung von Biomasse, Chemie Ingenieur Technik, Band 77(8):1156–1156 [2005], ISSN 0009-286X, doi:10.1002/cite.200580051.
- [24] Nussbaumer, T., Stickoxide bei der Holzverbrennung, Heizung Klima [1988].
- [25] Marutzky, R., Emissionminderung bei holzbetriebenen Kleinf Feuerungsanlagen, VDI-Berichte, Band 623:131–151 [1986], ISSN 0083-5560.
- [26] Bundesumweltministerium, Kleinf Feuerungsanlagen - Gesundheitliche Wirkung von Feinstaub aus der Holzverbrennung [2007].
- [27] Wiinikka, H. und Gebart, R., Experimental investigations of the influence from different operating conditions on the particle emissions from a small-scale pellets combustor, Biomass and Bioenergy, Band 27(6):645–652 [2004].
- [28] Verein deutscher Ingenieure, VDI 2066 Blatt 1: Messen von Partikeln Staubmessung in strömenden Gasen Gravimetrische Bestimmung der Staubbiladung, Beuth Verlag, Berlin [2006].
- [29] Pitel, J. und Mizak, J., Approximation of CO-lambda biomass combustion dependence by artificial intelligence techniques, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, Band 22 [2011].
- [30] Varol, M., Atimtay, A. T., Olgun, H. und Atakül, H., Emission characteristics of co-combustion of a low calorie and high sulfur-lignite coal and woodchips in a circulating fluidized bed combustor: Part 1. Effect of excess air ratio, Fuel, Band 117:792–800 [2014], ISSN 00162361, doi:10.1016/j.fuel.2013.09.051.

- [31] Serrano, C., Portero, H. und Monedero, E., Pine chips combustion in a 50kW domestic biomass boiler, *Fuel*, Band 111:564–573 [2013], ISSN 00162361, doi:10.1016/j.fuel.2013.02.068.
- [32] Boyd, S. und Vandenberghe, L., *Convex Optimization*, Cambridge University Press [2004], ISBN 0521833787.
- [33] Benesch, C., Scharler, R. und Obernberger, I., CFD simulation of NO_x formation in fixed-bed biomass combustion plants [2013].
- [34] Rumpf, M., Ausbrandregelung von Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen, Seite 98 [2013].
- [35] Skok, P. und Rimar, M., The Combustion of Wet Woodchips, *Manuf. and Ind. Eng.*, Band 11(3) [2012].
- [36] Yang, Y., Sharifi, V. und Swithenbank, J., Effect of air flow rate and fuel moisture on the burning behaviours of biomass and simulated municipal solid wastes in packed beds, *Fuel*, Band 83(11-12):1553–1562 [2004], ISSN 00162361, doi:10.1016/j.fuel.2004.01.016.
- [37] Verma, V. K., Bram, S., Delattin, F. und De Ruyck, J., Real life performance of domestic pellet boiler technologies as a function of operational loads: A case study of Belgium, *Applied Energy*, Band 101:357–362 [2013], ISSN 03062619, doi:10.1016/j.apenergy.2012.02.017.
- [38] Nuutinen, K., Jokiniemi, J., Sippula, O., Lamberg, H., Sutinen, J., Horttanainen, P. und Tissari, J., Effect of air staging on fine particle, dust and gaseous emissions from masonry heaters, *Biomass and Bioenergy*, Band 67:167–178 [2014], ISSN 09619534, doi:10.1016/j.biombioe.2014.04.033.
- [39] Salzmann, R. und Nussbaumer, T., Fuel Staging for NO_x Reduction in Biomass Combustion : Experiments and Modeling, *Energy & Fuels*, Band 15:575–582 [2001], ISSN 0887-0624, doi:10.1021/ef0001383.
- [40] Kortelainen, M., Jokiniemi, J., Nuutinen, I., Torvela, T., Lamberg, H., Karhunen, T., Tissari, J. und Sippula, O., Ash behaviour and emission formation in a small-scale reciprocating-grate combustion reactor operated with wood chips, reed canary grass and barley straw, *Fuel*, Band 143:80–88 [2015], ISSN 00162361, doi:10.1016/j.fuel.2014.11.006.
- [41] Lamberg, H., Sippula, O., Tissari, J. und Jokiniemi, J., Effects of air staging and load on fine-particle and gaseous emissions from a small-scale pellet boiler, *Energy and Fuels*, Band 25:4952–4960 [2011], ISSN 08870624, doi:10.1021/ef2010578.

- [42] Ziegler, J. G. und Nichols, N. B., Optimum Settings for Automatic Controllers, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Band 115(2B):220 [1993], ISSN 00220434, doi:10.1115/1.2899060.
- [43] Gölles, M., Bauer, R., Brunner, T., Dourdoumas, N. und Obernberger, I., Model based control of a biomass grate furnace, in *Proceedings of European conference on industrial furnaces and boilers*, Band 1, Seiten 1–10, Estoril [2011].
- [44] Bischof, J., Systemidentifikation und modellprädiktive Regelung für schadstoffarme Pelletverbrennung in kleinen Leistungsbereichen, Diplomarbeit, Universität Stuttgart [2012].
- [45] Schörghuber, C., Gölles, M., Dourdoumas, N., Brunner, T. und Obernberger, I., Modellbildung von Luft- und Rauchgaszirkulations-Zuführen bei Biomassefeuerungsanlagen, 18. steirisches Seminar über Regelungstechnik und Prozessautomatisierung [2013].
- [46] Bauer, R., Gölles, M., Brunner, T., Dourdoumas, N. und Obernberger, I., Modelling of pressures and volume flows for a biomass furnace[in german], *Automatisierungstechnik*, Band 55:404–10 [2007].
- [47] Gölles, M., Entwicklung mathematische Modell einer Biomasserostfeuerungsanlage als Grundlage für modellbasierte Regelungskonzepte, Dissertation, Technische Universität Graz [2008].
- [48] Bauer, R., Gölles, M., Brunner, T., Dourdoumas, N. und Obernberger, I., What Is Really Measured by Temperature Sensors in a Biomass Furnace?, at - *Automatisierungstechnik*, Band 55(12):600–607 [2007], doi:10.1524/auto.2007.55.12.600.
- [49] Coupek, D., Entwurf und Implementierung eines modellbasierten prädiktiven Reglers für die saubere Biomasseverbrennung, Diplomarbeit, Universität Stuttgart [2011].
- [50] Schneider, E., Modellbasierte Regelung von Gasturbinenbrennkammern zur Optimierung von Stickoxidemissionen und Verbrennungsinstabilitäten, Dissertation, Universität Stuttgart [2009], URL <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2009/4025/>.
- [51] QingJie Yang, Guohou Li und Xusheng Kang, Application of fuzzy PID control in the heating system, in *2008 Chinese Control and Decision Conference*, Seiten 2686–2690, IEEE [2008], ISBN 978-1-4244-1733-9, doi:10.1109/CCDC.2008.4597814.
- [52] Zhenjun, C. und Tong, Z., The concept of control strategy for heating furnace using regenerative burners, in *2010 International Conference on Mechanic Automation*

- and Control Engineering, Seiten 3750–3752, IEEE [2010], ISBN 978-1-4244-7737-1, doi:10.1109/MACE.2010.5535583.
- [53] Hofmann, G., Entwicklung und Erprobung einer Fuzzy-Feuerungsregelung, Dissertation, Universität Stuttgart [1998].
- [54] Haapa-Aho, J., Combustion improvement of small-scale pellet boiler by continuous control, Dissertation, Tampere University [2011].
- [55] Rembold, H., Frank, B., Haag, G., Britsch, H., Stutzenberger, H. und Müller, U., Air-fuel mixture regulating system in an internal combustion engine [1999].
- [56] Diez, K., Untersuchungen zum Einsatz der CO-Kantenregelung bei einem Pelletofen, Diplomarbeit, Universität Stuttgart [2011].
- [57] Hammer, F., Fasoulas, S., Messerschmid, E., Weber, H. und Houpert, B., Miniaturized CO/H₂-Sensor for Monitoring and Controlling Small Burners and Heaters, in 2nd European Conference on Small Burner and Heating Technology, Stuttgart (DE) [2000].
- [58] Völkel, M., Regelung der Verbrennungsluftmassenstroms bei Kleinf Feuerungsanlagen, Dissertation, Universität Stuttgart [2008].
- [59] Vogl, S., Einsatz der CO-Kantenregelung bei einem Pelletofen, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik [2010].
- [60] Hasler, P., Modern log wood boiler with fuzzy logic control, Kopetz, H.u.a. (Hrsg): Biomass for Energy and Industry [1998].
- [61] Good, J. und Nussbaumer, T., Regelung einer Stückholzfeuerung mit unterem Abbrand, Bundesamt für Energiewirtschaft [1993].
- [62] Zipser, S., Beitrag zur modellbasierten Regelung von Verbrennungsprozessen, Dissertation, Universität Karlsruhe [2004].
- [63] Struschka, M., Kiess, J., Zieba, M., Rieder, A., Juschka, W., Marks, A., Roßmann, P., Hammer, F. und Schuster, A., Dezentrale energetische Nutzung von Getreide und Stroh - Entwicklung neuer genehmigungsfähiger Verbrennungsanlagen, Technischer Bericht, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen [2008].
- [64] Hammer, F. und Weber, H., Sensorgesteuerte CO-Regelung zur Optimierung des Verbrennungsprozesses für Feuerungsanlagen kleiner und mittlerer Leistung [2006].
- [65] Kunstfeld, U., Detektion korrosiver Gase mit in Steinkohle befeuerten Kraftwerkskesseln, Dissertation, Universität Stuttgart [2010].

- [66] LAMTEC, Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co.KG, KS1D – Technical Data, Brochure-No. DLT3007-11-aEN-059 [2014].
- [67] Ljung, L., System Identification: Theory for the User (2nd Edition), Prentice Hall [1999], ISBN 0136566952.
- [68] Isermann, R. und Münchhof, M., Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing), Springer [2010], ISBN 3540788786.
- [69] Keesman, K. J., System Identification: An Introduction (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing), Springer [2011], ISBN 0857295217.
- [70] Calli, B. und Caarls, W., Comparison of extremum seeking control algorithms for robotic applications, International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Seiten 3195–3202 [2012], doi:10.1109/IROS.2012.6386180.
- [71] Ariyur, K. und Krstic, M., Analysis and design of multivariable extremum seeking, Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301), Band 4 [2002], ISSN 0743-1619, doi:10.1109/ACC.2002.1025231.
- [72] Rotea, M., Analysis of multivariable extremum seeking algorithms, Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.00CH36334), Band 1 [2000], ISSN 0743-1619, doi:10.1109/ACC.2000.878937.
- [73] Tao, G. T. G., Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control [Book Review], Control Systems, IEEE, Band 24 [2004], ISSN 1066-033X, doi:10.1109/MCS.2004.1275443.
- [74] Ghaffari, A., Krstić, M. und Nešić, D., Multivariable Newton-based extremum seeking, Automatica, Band 48:1759–1767 [2012], ISSN 00051098, doi:10.1016/j.automatica.2012.05.059.
- [75] Manzie, C. und Krstic, M., Extremum seeking with stochastic perturbations, IEEE Transactions on Automatic Control, Band 54:580–585 [2009], ISSN 00189286, doi:10.1109/TAC.2008.2008320.
- [76] Liu, S. J. und Krstic, M., Newton-based stochastic extremum seeking, in Automatica, Band 50, Seiten 952–961 [2014], ISBN 978-1-4673-2066-5, ISSN 00051098, doi:10.1016/j.automatica.2013.12.023.
- [77] Lavretsky, E., Hovakimyan, N. und Calise, A., Adaptive Extremum Seeking Control Design, American Control Conference, Band 1:567–572 [2003], doi:10.1109/ACC.2003.1239079.

- [78] Tan, Y., Moase, W., Manzie, C., Nesic, D. und Mareels, I., Extremum seeking from 1922 to 2010, Control Conference (CCC), 2010 29th Chinese [2010].
- [79] Bischof, J., Baumbach, G. und Struschka, M., A New Approach for CO-based Control of Small-scale Biomass Furnaces, in Proceedings of 21th European Biomass Conference and Exhibition, Band 21, Kopenhagen [2013].
- [80] Magnani, A. und Boyd, S., Convex Piecewise-Linear Fitting, Optimization and Engineering, Band 10(1):1-17 [2009].
- [81] Loffeld, O., Estimationstheorie II, Anwendungen - Kalman-Filter, Oldenburg Verlag [1990].
- [82] Haykin, S., Kalman Filtering and Neural Networks, Wiley-Interscience [2001], ISBN 0471369985.
- [83] Schlitt, H., Systemtheorie für stochastische Prozesse: Statistische Grundlagen, Systemdynamik, Kalman-Filter, Springer [1992], ISBN 3540542884.
- [84] Kalman, R., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering, Band 82((Series D)):35 – 45 [1960].
- [85] Schrick, K.-W., Anwendungen der Kalman-Filter-Technik: Anleitung und Beispiele, Oldenbourg, Oldenbourg [1977], ISBN 3486209310.
- [86] Bryson, A. und Johansen, D., Linear filtering for time-varying systems using measurements containing colored noise, IEEE Transactions on Automatic Control, Band 10(1):4–10 [1965], ISSN 0018-9286, doi:10.1109/TAC.1965.1098063.
- [87] Gölles, M., Reiter, S., Brunner, T., Dourdoumas, N. und Obernberger, I., Model based control of a small-scale biomass boiler, Control Engineering Practice, Band 22:94–102 [2014].
- [88] Bauer, R., Gölles, M., Brunner, T., Dourdoumas, N. und Obernberger, I., Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes, Biomass and Bioenergy, Band 34(4):417–427 [2010], ISSN 09619534, doi:10.1016/j.biombioe.2009.12.005.
- [89] Nussbaumer, T. und Kerschbaumer, D., Normierung und Mittelwertbildung von Emissionsmesswerten, Heizungstechnik, Band 11 [1987].