Emissionsbasierende Regelungsalgorithmen zur Reduktion von Stickstoffoxiden

M. JEITLER, C. WARTHA
Fachhochschule Burgenland GmbH, Pinkafeld, Österreich

ABSTRACT: In this study, the design of control algorithms is carried out in order to reduce the emissions of NO_X at source of a biomass combustion unit. Therefore, an experimental examination on a pilot facility was investigated. Before starting the test procedure, a detailed test planning was prepared. With the systematic procedure and the model generator, significant correlations between NO_X formation and all the parameters that influence the NO_X-formation mechanism can be identified. There are correlations between the concentration of oxygen, CO and NO_X which occurred in the exhaust gases. The found correlations of the process-related NO_X formation are the basis for the development of emission based PI-controllers by using the researched models of the considered control loops. Based on the results of the investigations a controlling concept for the monitored biomass combustion unit was developed in order to achieve the objective targeted NO_X reduction on a sustainable basis. After the implementation of the new developed emission based process control, results showed a reduction of the NO_X-emissions by 23 %. Due to a lower excess oxygen in the furnace an improvement of about 0.6 % of the boiler efficiency was achieved.

1. EINLEITUNG

Durch eine energetische Nutzung von Biomasse wird eine Steigerung des Anteils von erneuerbaren Energieträgern sowie eine Reduktion von Treibhausgasen erreicht. Eine immer größer werdende Problematik stellen die bei der Verbrennung von Biomasse entstehenden Stickstoffoxide dar. Die Reduktion von Stickstoffoxid-Emissionen ist aufgrund immer strengerer behördlich vorgeschriebener Emissionsgrenzwerte von großer Relevanz. (Umweltbundesamt, 2015)

1.1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Der bis jetzt ständig steigende Anteil von Biomasseverbrennungsanlagen hat dazu geführt, dass die Hersteller von Biomassekesseln das Emissionsniveau, insbesondere durch kostengünstige Primärmaßnahmen, deutlich absenken möchten und daher bereit sind entsprechende Entwicklungen anzugehen. Vor allem die im hohen Ausmaß variierenden Stickstoff-Konzentrationen im Brennstoff erfordern sehr gut durchdachte Feuerraumgeometrien und eine optimierte Anordnung und Regelung der Verbrennungsluft, um die behördlich vorgeschriebenen Grenzwerte für Stickstoffoxidemissionen unter möglichst geringem Einsatz von Sekundärmaßnahmen einzuhalten. Speziell bei Anlagen mit höherer Leistung sind die Durchführung von permanenten Emissionsmessungen und die ständige Aufzeichnung von vorgeschriebenen messtechnisch erfassten Emissionswerten zwingend erforderlich. Diese geforderten Messdaten können in weiterer Folge mit neu entwickelten Regelungsalgorithmen zu einer intelligenten Verbrennungsregelung genutzt werden, um eine nachhaltige Reduktion von NO_X zu erreichen. Eine große Anforderung hinsichtlich der Reduktion von Emissionen stellen dabei jene Verbrennungsanlagen dar, in welchen saison- und wirtschaftsbedingt verschiedene Brennstoffe mit unterschiedlichen Heizwerten bzw. Wassergehalt verfeuert werden (Sägespäne, Altholz, Rinde, Pellets). Vor allem die Problematik der veränderbaren Brennstoffe kann mit Hilfe von neu entwickelten Regelungsalgorithmen sowie einer messtechnischen Erfassung der emittierten Stickstoffoxidemissionen entgegengewirkt werden. Die Verwendung von speicherprogrammierbaren Steuerungssystemen erlaubt eine Realisierung von den zur Reduktion von Emissionen benötigten Mehrgrößenregelungsalgorithmen, um somit einen nachhaltigen emissionsarmen Analgenbetrieb zu erreichen. Im Zuge einer durchgeführten Forschungsarbeit wurden diverse

prozessspezifische Zusammenhänge bei der Entstehung von Stickstoffoxiden experimentell an einer in Betrieb befindenden Biomasseverbrennungsanlage bestimmt. Aus den gewonnen Zusammenhängen wurden für eine emissionsbasierende Regelung des Feuerungsprozesses Regelungsalgorithmen entwickelt, mit denen die Emissionen von Stickstoffoxiden nachhaltig reduziert werden können. Diese neuen Regelungsalgorithmen wurden in der Programmiersprache „Automation Basic" erstellt und an der Versuchsanlage zum Einsatz gebracht, auf deren Verhalten getestet und im Anschluss während eines durchgeführten Testlaufes optimiert.

1.2 GRUNDLAGEN

Aufgrund der hohen Prozessabhängigkeit bei der Entstehung von Stickstoffoxiden sind Änderungen an der Prozess- bzw. Steuerungs- und Regelungstechnik des Verbrennungsablaufes besonders erfolgversprechend. Durch die Anwendung von primären Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffoxidemissionen soll bei Biomasseverbrennungsanlagen vorrangig der im Brennstoff enthaltene Stickstoff (N) sowie bereits im Verbrennungsprozess gebildetes Stickstoffmonoxid (NO) in elementaren Stickstoff (N_2) umgewandelt werden. Die dafür erforderlichen Prozessbedingungen werden grundsätzlich durch die Verbrennungstemperatur, das vorhandene Sauerstoffangebot und der Verweilzeit bestimmt. In Verbrennungsanlagen basiert die Bildung von Stickstoffoxiden auf dem im Brennstoff gebundenen sowie auf dem in der Verbrennungsluft enthaltenen Stickstoff. Zusätzlich zu den während der Pyrolyse freigesetzten Kohlenwasserstoffverbindungen wird ebenfalls ein Teil des Brennstoffstickstoffes freigesetzt und somit im Wesentlichen alle vorkommenden HCN- bzw. NH_i-Verbindungen gebildet. Diese Radikale entstehen in der unmittelbaren Flammenzone im Zeitbereich von einer Millisekunde. Danach wird bei Luftüberschuss ($\lambda>1$) der freigesetzte Brennstoffstickstoff verstärkt zu NO umgesetzt, was ebenfalls durch die Anwesenheit von Wasser begünstigt wird. Das über den Brennstoff in die Feuerung eingebrachte Wasser stellt dabei die zur Stickstoffoxidation benötigten OH-Radikale zur Verfügung. Im Falle einer unterstöchiometrischen Verbrennung ($\lambda<1$) erfolgt in den vorhandenen sauerstoffarmen Zonen im Verbrennungsraum die Umsetzung des freigesetzten im Brennstoff enthaltenen Stickstoffes zu molekularen Stickstoff. Dabei wird vor allem das zuvor entstandene Stickstoffmonoxid durch eine Reaktion mit den vorhandenen NH-Radikalen zu elementaren Stickstoff (N_2) reduziert. Ebenso kann es zur Reduktion von NO zu N_2, durch die Einwirkung von vorhandenen unverbrannten Stoffen wie CO, C_nH_m und H_2, welche als Reduktionsmittel wirken, kommen. (Kaltschmitt, 2009)

1.3 METHODIK

Nach einer detaillierten Versuchsplanung wurde in weiterer Folge der Feuerungsprozess einer sich in Betrieb befindenden mit Biomasse befeuerten Kraftwärmekopplungsanlage explizit auf die beeinflussenden Faktoren von Stickstoffoxidemissionen betrachtet und die dafür benötigten Regelungsalgorithmen zur Minimierung entwickelt und deren Verhalten experimentell überprüft und optimiert. Die Entwicklung von Regelkreisen zur nachhaltigen Reduktion von Stickstoffoxiden wurde mittels experimentellen Analysen durchgeführt. Dabei wurden zur Realisierung der aufgefundenen regelungstechnisch beeinflussbaren primären Maßnahmen explizit die im betrachteten Verbrennungsprozess vorhandenen Stellgrößen und Stellglieder, bestehend aus der Vorgabe des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas, der vorhandenen Rauchgasrezirkulationsluftklappe sowie der fünf vorhandenen sekundären Verbrennungsluftventilatoren, verwendet. Durch diese neu entwickelten Regelalgorithmen können dadurch in weiterer Folge eine Kontrolle der emittierten NO_X-Emissionen und die zielgerechte permanente Beeinflussung des Verbrennungsprozesses durchgeführt werden.

2. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Versuchsdurchführung dient zur experimentellen Ermittlung von veränderbaren Prozessgrößen, welche nachweislich eine Beeinflussung der emittierten NO_X-Konzentration bewirken. Als Versuchsanlage wird eine mit Biomasse befeuerte Kraftwärmekopplungsanlage betrachtet, welche durch die Verbrennung von Biomasse elektrische und thermische Energie erzeugt. Abb. 1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau der als Versuchsanlage verwendeten Biomasseverbrennungsanlage mit allen wesentlichen Aktoren und Sensoren.

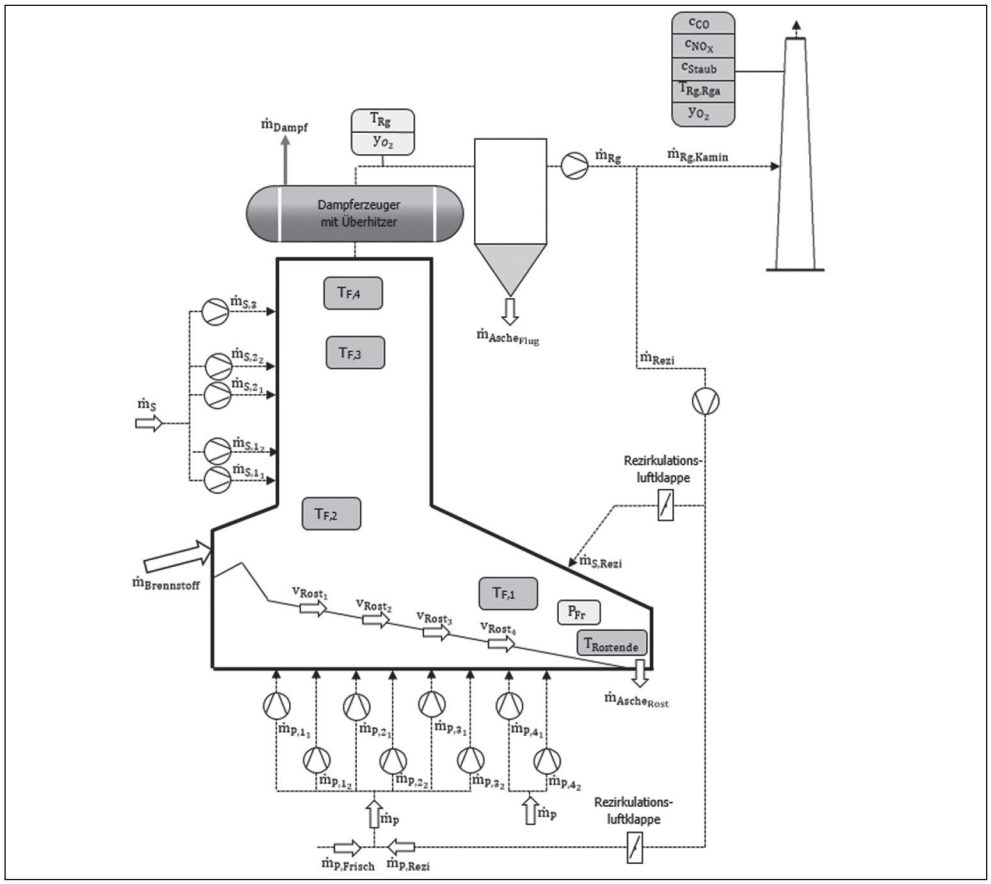

Abb. 1: Vorhandene Aktoren und Sensoren der Verbrennungsanlage

2.1 ÄNDERUNG DES RESTSAUERSTOFFGEHALTES IM RAUCHGAS

Zur Auffindung der Zusammenhänge zwischen den im Verbrennungsprozess gebildeten Stickstoffoxiden und dem im emittierten Rauchgas vorhandenen Sauerstoffgehalt wird ein Stellgrößensprung des in der Prozessregelung verarbeiteten Sollwertes für den Restsauerstoffgehalt im Rauchgas durchgeführt. In Abb. 2 ist der dabei auftretende zeitliche Verlauf der Konzentrationen der Emissionen von NO_X und CO über eine Zeitspanne von 4,25 Stunden, bei der durchgeführten sprungförmigen Sollwertveränderung des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas von 5,3 auf 8 Vol.-%, dargestellt. Bei einem Restsauerstoffgehalt von 8 Vol.-% kommt es dabei zu einer permanenten Grenzwertüberschreitung der emittierten NO_X-Konzentration bei nur minimal reduzierter CO-Konzentration. Aus der statischen Kennlinie der betrachteten Regelstrecke, ergibt sich ein Bestimmungsmaß von R^2=0,73.

Bei der Untersuchung des vorhandenen Feuerungsprozesses wurde ein bestehender Zusammenhang zwischen den CO- und NO_X-Emissionen sowie dem im Rauchgas vorhandenen Restsauerstoffgehalt festgestellt. Ein Anstieg der CO-Konzentration im Rauchgas, welcher durch unvollständige Verbrennung verursacht wird, bewirkt zeitgleich eine Reduktion der emittierten NO_X-Konzentration. In einer reduzierenden Atmosphäre, welche unter Luftmangel entsteht, wird das bereits im Verbrennungsprozess gebildete NO in N_2 umgewandelt. Genau diese erforderlichen reduzierenden Bedingungen entstehen dabei bei geringem vorhandenem Sauerstoffüberschuss im Brennraum. Nachteilig wirkt sich dieser Zusammenhang jedoch auf die emittierte CO-Konzentration aus, welche aufgrund des in der Reaktionszone herrschenden Sauerstoffmangels markant ansteigt.

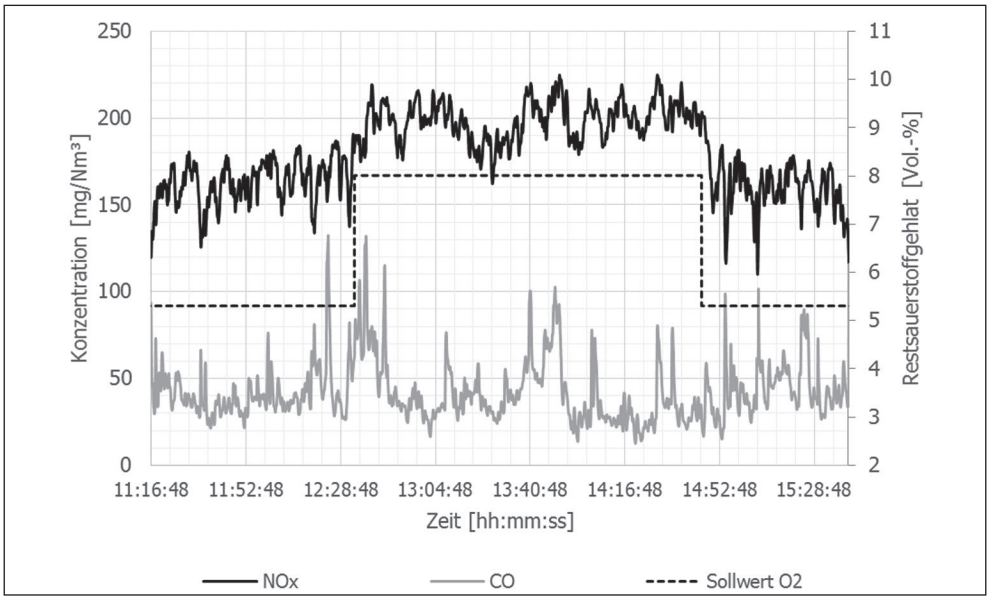

Abb. 2: Zeitlicher Verlauf des Sollwertsprunges und der emittierten Konzentrationen von CO und NO_X im Rauchgas bei konstantem Einfluss der Störgrößen

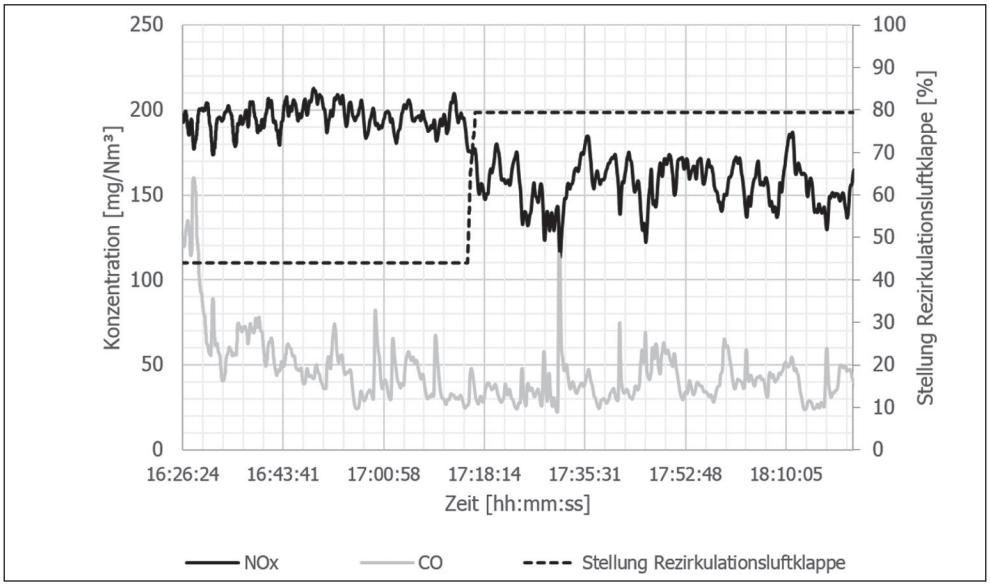

Abb. 3: Zeitlicher Verlauf der emittierten Konzentrationen von CO und NO_X im Rauchgas bei sprunghafter Änderung der Stellung der Rauchgasrezirkulationsluftklappe bei konstantem Einfluss der Störgrößen

2.2 ÄNDERUNG DES VOLUMENSTROMES DER IN DIE NACHVERBRENNUNGSZONE EINGEBRACHTEN RAUCHGASREZIRKULATIONSLUFT

Zur Auffindung der Zusammenhänge zwischen den im Verbrennungsprozess gebildeten Stickstoffoxiden und der in der Nachverbrennungszone des Feuerraumes eingebrachten Rauchgasrezirkulationsluft wird an der zur Veränderung des Volumenstromes vorhandenen Rauchgasrezirkulationsluftregelklappe ein dementsprechender Stellgrößensprung durchgeführt. In der Abb. 3 ist der dabei auftretende zeitliche Verlauf der Konzentrationen der Emissionen von NO_X und CO über eine Zeitspanne von 2 Stunden, bei der durchgeführten sprungförmigen Sollwertveränderung der Stellung der Rauchgasrezirkulationsluftklappe von 44 auf 80 %, dargestellt. Aus der statischen Kennlinie der betrachteten Regelstrecke ergibt sich ein Bestimmungsmaß von R^2=0,77.

Die Erhöhung der in die Nachverbrennungszone der Feuerung eingebrachten Rauchgasrezirkulationsluft führt zu verstärkt vorkommenden unterstöchiometrischen Reaktionsbedingungen sowie zu einer besseren Durchmischung der Brenngase im Brennraum. Durch diese vorhandenen Bedingungen wird das im Brennraum vorhandenen NO verstärkt zu elementaren Stickstoff reduziert.

2.3 ÄNDERUNG DES VOLUMENSTROMES DER IN DIE NACHVERBRENNUNGSZONE EINGEBRACHTEN SEKUNDÄREN VERBRENNUNGSLUFT

Abb. 4 zeigt die zeitlichen messtechnisch erfassten Konzentrationsverläufe der während der Versuchsdurchführung im Rauchgas vorhandenen Konzentrationen von CO und NO_X sowie die mit dem Dampferzeuger erzeugte Dampfmenge, bei einer sprunghaften Änderung von den Drehzahlen der vorhanden sekundären Verbrennungsluftventilatoren, über eine Zeitspanne von 110 Minuten. Aus der statischen Kennlinie ergibt sich ein Bestimmungsmaß von R^2=0,79.

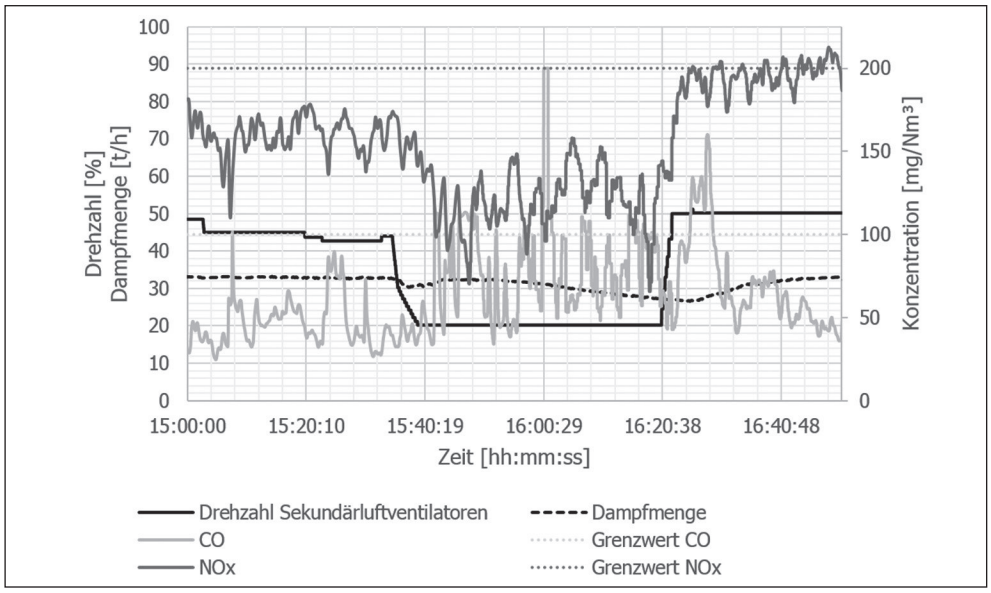

Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der emittierten Konzentrationen von CO und NO_X im Rauchgas bei sprunghafter Änderung der Drehzahl der Sekundärluftventilatoren bei konstantem Einfluss der Störgrößen

Nach erfolgter sprungförmiger Absenkung der Drehzahl der vorhandenen fünf Sekundärluftventilatoren ergibt sich eine Reduktion der emittierten NO_X-Konzentration um einen durchschnittlichen Wert von 20 mg/Nm³. Dieses Verhalten ist auf eine Verminderung des in die Nachverbrennungszone eingebrachten Sauerstoffes zurückzuführen, wodurch im Brennraum aufgrund eines dadurch hervorgerufenen Sauerstoffmangels, reduzierende Bedingungen geschaffen werden, welche zur Reduktion des in der Feuerung entstandenen Stickstoffmonoxids durch die vorhandenen NH-Radikale zu elementaren Stickstoff führt. Durch den vorhandenen Sauerstoffmangel kommt es jedoch zu einem beobachtbaren Anstieg der emittierten CO-Konzentration im Rauchgas, wobei punktuell eine Überschreitung des behördlich fixierten Grenzwertes von 100 mg/Nm³ erfolgt. Ebenfalls führt eine zu starke Reduktion von der in den Brennraum der Nachverbrennungszone eingebrachten sekundären Verbrennungsluft zu einem Abfall der Kesselleistung, welche in der Abb. 4 mit der erzeugten Dampfmenge dargestellt ist. Durch den verursachten Abfall des produzierten Dampfmassenstromes von 6 t/h konnte in weiterer Folge der an die Dampfturbine gekoppelte Generator die geforderte Nennleistung von 7 MW nicht mehr erzeugen.

Wird zur Kontrollierung der emittierten Stickstoffoxide die Drehzahl der vorhandenen Sekundärluftventilatoren verwendet, so muss dabei die Regelung der Kesselleistung als Hauptregelart realisiert werden. Auf diesen Regler kann die Regelung der messtechnisch erfassten Konzentration des emittierten Stickstoffoxids überlagert werden. Wichtig dabei ist, dass die Drehzahl der sekundären Verbrennungsluftventilatoren zur Reduktion des emittierten Stickstoffoxids nur soweit verringert werden sollte, bis ein Anstieg der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid auftritt.

3. REGELUNGSKONZEPT

Für die vorhandene Versuchsanlage wurde zur Reduktion der emittierten Stickstoffoxide das in Abb. 5 abgebildete emissionsbasierende Mehrgrößenregelungskonzept entwickelt. Dieses beinhaltet zur Kontrollierung der emittierten Stickstoffoxide die entwickelten PI-Regelungsalgorithmen für die Vorgabe des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas, der in die Feuerung einzubringenden Rauchgasrezirkulationsluft sowie die Luftmenge der sekundären Verbrennungsluft.

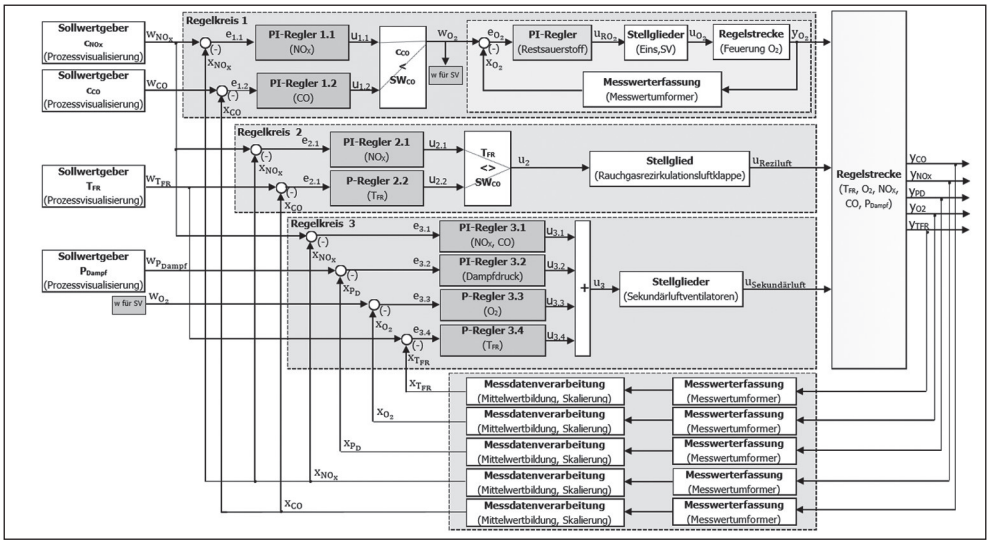

Abb. 5: Vereinfachtes Blockschaltbild der entwickelten Regelkreise für die Kontrollierung der Emission von Stickstoffoxiden

Im in Abb. 5 dargestellten Regelkreis 1 erfolgt durch die Verwendung von zwei unabhängigen PI-Regelungsalgorithmen die Berechnung des erforderlichen Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas, mit welcher der Verbrennungsprozess betrieben werden soll. Dabei erfolgt zusätzlich zur Kontrollierung der auftretenden NO_X-Emissionen eine permanente Überwachung der messtechnisch erfassten emittierten CO-Konzentration im Abgas, was im Falle einer Grenzwertüberschreitung zur Aktivierung des CO-PI-Reglers führt, um bei zu geringem Luftüberschuss im Feuerungsprozess der ansteigenden CO-Konzentration mit der Steigerung der Drehzahlen der Sekundärluftventilatoren entgegenzuwirken. Bei vorhandener erlaubter CO-Konzentration im Abgas wird somit in erster Linie die emittiere NO_X-Konzentration durch die Veränderung des im Rauchgas vorhandenen Restsauerstoffgehaltes regelungstechnisch kontrolliert. Im Falle eines zu hohen Anstieges der emittierten CO-Konzentration wird stoßfrei auf den CO-Regelalgorithmus umgeschaltet. Dieser Ablauf des Regelungsprozesses erlaubt somit jenen Anlagenbetriebszustand aufzufinden und aufrechtzuerhalten, bei welchen durch die permanente Veränderung des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas die emittierten Konzentrationen von CO sowie NO_X minimiert werden.

Der in Abb. 5 abgebildete Regelkreis 2 wird zur Kontrollierung der emittierten NO_X-Konzentration im Abgas sowie der Feuerraumtemperatur in der Verbrennungszone die vorhandene Regelklappe für die Rauchgasrezirkulation verwendet. Dabei erfolgt in erster Linie eine permanente Überwachung einer minimalen Feuerraumtemperatur. Dieser Regelkreis wird im Falle einer Temperaturunterschreitung aktiviert, welcher zu einer Reduktion der in die Feuerung eingebrachten Rauchgasrezirkulationsluft führt. Im Falle einer ausreichend hohen Verbrennungstemperatur wird mit Hilfe eines PI-Regelungsalgorithmus die emittierte NO_X-Konzentration kontrolliert.

Die vorhandenen fünf Sekundärluftventilatoren werden als Stellglieder im Regelkreis 3 verwendet. Zusätzlich zu den vorhanden drei Regelungsalgorithmen (Leistungsregelung, Restsauerstoffgehaltregelung und Feuerraumtemperaturregelung) wurde der neu entwickelte emissionsbasierende Regelungsalgorithmus zur Kontrolle der emittierten NO_X-Konzentration implementiert. Dabei werden die resultierenden Stellgrößen für die Drehzahl der jeweils vorhandenen sekundären Verbrennungsluftventilatoren aus der Summe der folgenden vier Reglerausgängen berechnet:

- Leistungsregler
  Die daraus resultierende Drehzahlvorgabe der fünf vorhandenen Sekundärluftventilatoren wird dabei vom im Dampferzeuger vorhandenen Dampfdruck bestimmt. Zur Kontrollierung des Dampfdruckes im Dampferzeuger wird ein dementsprechender PI-Regler verwendet.
- Restsauerstoffgehaltsregler
  Mit der Veränderung der in die Nachverbrennungszone eingebrachten sekundären Verbrennungsluft erfolgt eine Kontrollierung des im Rauchgas vorhandenen Restsauerstoffgehaltes. Dafür wird ein P-Regelungsalgorithmus angewendet.
- Feuerraumtemperaturregler
  In Abhängigkeit von der in der Nachverbrennungszone der Feuerung herrschenden Temperatur, wird die Drehzahl der vorhandenen fünf sekundären Verbrennungsluftventilatoren mit Hilfe eines P-Regelungsalgorithmus verändert. Dabei führt ein erhöhter, in die Nachverbrennungszone der Feuerung eingebrachter Luftvolumenstrom tendenziell zu niedrigeren Feuerraumtemperaturen.
- CO- und NO_X-Regler
  Die Kontrolle der im Abgas emittierten CO- sowie NO_X-Konzentrationen erfolgt über PI-Regelungsalgorithmen. Als Hauptregelart wird dabei die NO_X-Regelung verwendet. Im Falle eines Anstieges der CO-Konzentration im Abgas wird der NO_X-Regelungsmechanismus verlassen und stoßfrei auf die CO-Regelung umgeschaltet und in weiterer Folge die Drehzahl erhöht. Durch diesen Betriebsmodus wird ebenfalls ein Minimum der beiden Emissionen von CO und NO_X nachhaltig erreicht.

4. ERGEBNISSE

Während des durchgeführten Testbetriebes wurde die Kraftwärmekopplungsanlage bei Nennlast betrieben. Als Brennstoff wurde eine Mischung, bestehend aus Rinde und Waldhackgut, mit einen Wassergehalt von 50,11 Gew.-%, verwendet.

Im betrachteten Zeitraum wurden die in Abb. 6 dargestellten emittierten Konzentrationsverläufe von NO_X und CO im Abgas, während des Anlagenbetriebes, vor und nach Implementierung der neu entwickelten emissionsbasierenden Regelungsalgorithmen aufgezeichnet. Bei den angeführten Messwerten handelt es sich um arithmetische Mittelwerte, welche mit einer Zykluszeit von 20 ms eigelesen und über eine Zeitspanne von 2 Sekunden gemittelt wurden.

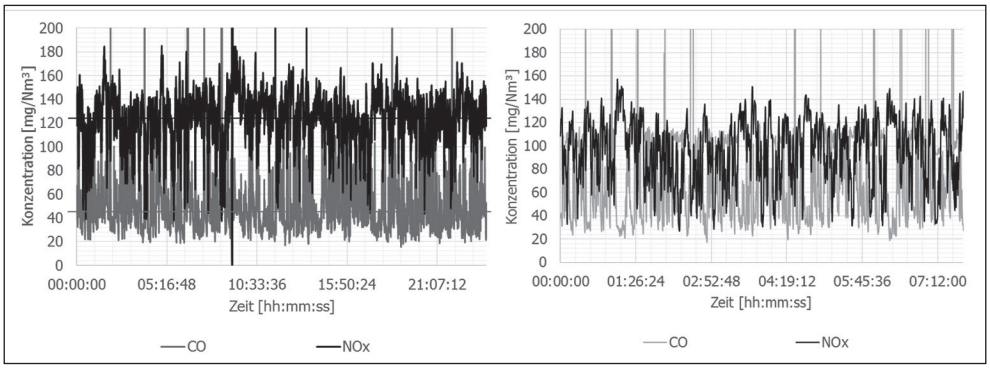

Abb. 6: Zeitlicher Konzentrationsverlauf der emittierten Emissionen von NO_X und CO vor und nach der Implementierung der neu entwickelten Regelungsalgorithmen

Tab. 1: Gegenüberstellung der gemittelten Prozessdaten vor und nach Implementierung der entwickelten Regelungsalgorithmen

Bezeichnung	Messgröße	Wert ohne Verwendung der Emissionsregel-algorithmen	Wert mit Verwendung der Emissionsregel-algorithmen	Veränderung
NO_X	Konzentration	123,86 mg/Nm³	96,74 mg/Nm³	-27,12 mg/Nm³
CO	Konzentration	54,21 mg/Nm³	75,58 mg/Nm³	21,37 mg/Nm³
O_2	Volumenanteil	3,62 Vol.-%	2,77 Vol.-%	-0,85 Vol.-%

Ein Vergleich der erzeugten Emissionen von CO bzw. NO_X vor und nach durchgeführter Implementierung der neu entwickelten emissionsbasierenden Regelkreise, welche in Abb. 6 sowie in der Tab. 1 dargestellt sind, zeigt eine deutliche Reduktion der emittierten NO_X-Konzentrationen. Dabei kann durch die Verwendung der neu entwickelten emissionsbasierenden Regelungsalgorithmen die durchschnittliche emittierte Konzentration von NO_X um mehr als 27 mg/Nm³ reduziert werden. Diese Reduktion wird durch eine Verringerung des im Rauchgas der Verbrennungsanlage vorhandenen Restsauerstoffgehaltes um 0,85 Vol.-% sowie durch eine Erhöhung der in die Feuerung eingebrachten Rauchgasrezirkulationsluft erreicht. Als negativer Nebeneffekt kommt es aufgrund des geringeren Luftüberschusses im Verbrennungsprozess zu erhöhter CO-Bildung. Durch die Aktivierung des entwickelten Limiterreglers „CO-Konzentration Maximum“ kann durch eine daraus resultierende Erhöhung des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas dem erfolgreich entgegengewirkt werden, damit es nachhaltig zu keiner Grenzwertüberschreitung kommt. Eine Verringerung des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas führt zu einem geringeren Verbrennungsluftbedarf, somit wird durch diese Betriebsweise des Feuerungsprozesses eine Wirkungsgradsteigerung erreicht.

Abb. 7 zeigt den zeitlichen Verlauf von der in das System als Stellgröße einwirkenden Sollvorgabe des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas, bei einer dabei auftretenden Grenzwertüberschreitung der messtech-

nisch erfassten CO-Konzentration. Ein Anstieg der im Rauchgas vorhandenen CO-Konzentration führt zu einer Erhöhung des im Rauchgas vorhandenen Restsauerstoffgehaltes. Durch die Anhebung des Luftüberschusses im Verbrennungsprozess wird, damit vermehrt CO zu CO_2 oxidiert, sodass in weiterer Folge der gegebene Grenzwert von 80 mg/Nm³ wieder unterschritten wird. Der durch den realisierten Regelungsalgorithmus hervorgerufene Luftüberschuss führt jedoch zu steigenden NO_X-Emissionen.

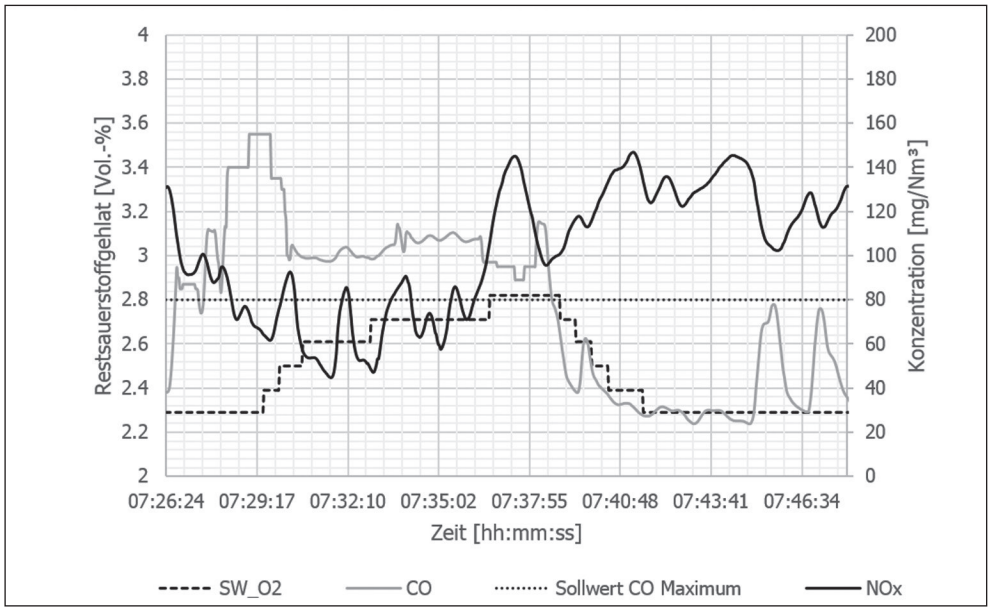

Abb. 7: Zeitlicher Konzentrationsverlauf der emittierten Emissionen von NO_X und CO bei Aktivierung der Limiter-Regelung „Maximale CO-Konzentration im Rauchgas“

Tab. 2 zeigt die Ergebnisse aus einer durchgeführten Verbrennungsrechnung, welche jeweils von den vorhandenen Anlagenbetriebsdaten vor sowie nach der Implementation der neuen emissionsbasierenden Regelungsalgorithmen durchgeführt wurde.

Durch die neu entwickelten und zum Einsatz gebrachten emissionsbasierenden Regelungsalgorithmen ergibt sich dabei eine Verbesserung des Kesselwirkungsgrades um 0,37 %. Bei angenommenen 8.000 Volllaststunden im Jahr werden bei Nennlastbetrieb der Anlage somit 442 Tonnen weniger Biomassebrennstoff benötigt. Ebenso verringert sich die jährliche emittierte Fracht von NO_X um 8.619 kg.

Tab. 2: Änderung des Anlagenverhaltes durch die Implementierung der emissionsbasierenden Regelungsalgorithmen prognostiziert auf ein Jahr

Bezeichnung	**Zeichen**	**Einheit**	**Wert vorher**	**Wert nachher**
Jährliche Volllaststunden	$t_{Volllast}$	h	8.000	8.000
Unterer Heizwert des Brennstoffes	H_U	kWh/kg	2,2	2,2
Kesselleistung	Q_K	kW	26.043	26.043
Anteil Wärmeverluste (Strahlung, Konvektion)	a_{Strahl}	%	1,85	1,85
Abgastemperatur	T_{Abgas}	°C	140,0	140,0
O_2-Gehalt im trockenen Rauchgas	$y_{O2,tr}$	Vol.-%	4,80	3,74
O_2-Gehalt im feuchten Rauchgas	y_{O2}	Vol.-%	3,62	2,77
Konzentration NO_X bezogen auf den tats. O_2-Gehalt im feuchten Rauchgas	c_{NOx}	mg/Nm³	71,25	53,08
Kesselwirkungsgrad	η_K	%	89,32	89,69
Jährlich emittierte feuchte Rauchgasmenge	$V_{RG,f}$	Nm³/a	413.507.996	392.710.659
Jährlich emittierte Fracht von NO_X	m_{NOx}	kg/a	29.464	20.845
Jährlicher Brennstoffbedarf	$\mathbf{m_B}$	$\mathbf{t_{feucht}/a}$	**107.770**	**107.328**

5. SCHLUSSFOLGERUNG, ZUSAMMENFASSUNG

Bei mit Biomasse befeuerten Verbrennungsanlagen können NO_X-Emissionen durch primäre Maßnahmen in der Führung des Feuerungsprozesses nachhaltig reduziert werden. Dadurch können kostspielige Sekundärmaßnahmen entfallen. Durch eine durchgeführte experimentelle Analyse des Feuerungsprozesses von einer sich in Betrieb befindenden Biomasseverbrennungsanlage wurden Zusammenhänge zwischen den erzeugten NO_X- und CO-Emissionen sowie in weiterer Folge eine generelle Abhängigkeit vom im Feuerungsprozess herrschenden Luftüberschuss festgestellt. Dabei führt ein niedriger Luftüberschuss generell zu geringeren NO_X-Bildungsraten bei Steigerung des Feuerungswirkungsgrades. Aufgrund der dabei vorgefundenen Unabhängigkeit der im Feuerungsprozess entstehenden NO_X-Konzentrationen von einer bis zu maximal 1200 °C ansteigenden Verbrennungstemperatur wird die Brennstoff-NO Bildung als hauptverantwortlicher Bildungsmechanismus im betrachteten Feuerungsprozess erkannt. Eine nachhaltige NO_X-Reduktion kann durch die Herstellung von partiellen reduzierenden Bedingungen im Verbrennungsraum durch eine Absenkung des Luftüberschusses erreicht werden. Dabei wird vor allem das zuvor entstandene Stickstoffmonoxid (NO) durch eine Reaktion mit den vorhandenen NH-Radikalen zu elementaren Stickstoff (N_2) reduziert. Zur Kontrollierung des Luftüberschusses wird dafür der messtechnisch erfasste Volumenanteil des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas verwendet. Eine Möglichkeit zur erfolgreichen Realisierung von Primärmaßnahmen bietet der Einsatz von intelligenten emissionsbasierenden Mehrgrößenregelungsalgorithmen, welche durch den Einsatz von speicherprogrammierbaren Steuerungen realisiert werden können. Voraussetzung dafür ist eine permanente messtechnische Erfassung von den im Abgas auftretenden NO_X- und CO-Konzentrationen sowie der im Rauchgas vorhandene Restsauerstoffgehalt. Durch ein Zusammenwirken von mehreren Regelkreisen kann der Verbrennungsprozess auf ein stets optimales Verhältnis der sich gegenseitig beeinflussenden erzeugten Emissionen von CO und NO_X betrieben werden.

Die experimentelle Analyse des vorhandenen Feuerungsprozesses der betrachteten Versuchsanlage zeigt, dass eine gezielte Absenkung des im Brennraum vorhandenen Luftüberschusses zu einer Reduktion der

emittierten NO_X-Konzentrationen führt. Aus den dabei ermittelten Messwerten des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas und der dabei emittierten NO_X-Konzentration wird ein statistisches Bestimmtheitsmaß von R^2=0,73 berechnet. Nachteilig sind die bei geringeren Luftüberschuss vermehrt auftretenden CO-Emissionen. Durch diese Gegebenheit muss mittels überlagerte Regelkreise der optimale Sollwert des Restsauerstoffgehaltes stets auch unter Einflussnahme der im Abgas vorhandenen CO-Konzentration kontrolliert und danach angepasst werden, was somit eine alternierende Abarbeitung der beiden Regelungsalgorithmen erfordert. Somit stehen die beiden Regelungsmechanismen strikt in Verbindung. Eine Verringerung des Restsauerstoffgehaltes im Rauchgas darf hinsichtlich der Verminderung der emittierten NO_X-Konzentration im Abgas nur bis zum Auftreten einer maximalen vorgegebenen CO-Konzentration erfolgen. Dieser aufgefundene Betriebspunkt stellt dabei ebenfalls ein Wirkungsgradoptimum dar und muss stets an die im Verbrennungsprozess einwirkenden Störgrößen angepasst werden. Für diese regelungstechnische Beeinflussung werden PI-Regelungsalgorithmen verwendet.

Eine Beeinflussung der im Feuerungsprozess entstehenden NO_X-Konzentration zeigt sich ebenfalls bei einer Veränderung von der in die Nachverbrennungszone des Brennraumes eingebrachten Rauchgasrezirkulationsluftmenge. Dabei verursacht eine Erhöhung des eingebrachten Volumenstromes vermehrt NO-reduzierende Bedingungen in der Reaktionszone, was in weiterer Folge zu einer Verringerung der emittierten NO_X-Konzentration im Abgas führt. Für diesen aufgefundenen Zusammenhang wird ein Bestimmtheitsmaß von R^2=0,76 ermittelt. Durch die Einbringung von Rauchgasrezirkulationsluft in die Nachverbrennungszone wird im Allgemeinen eine bessere Vermischung der brennbaren Gase erreicht, wodurch der Verbrennungsprozess in der Regel mit einem geringeren Sauerstoffüberschuss betrieben werden kann, was wiederum zu einer Erhöhung des Feuerungswirkungsgrades führt. Als Voraussetzung dafür ist jedoch eine optimale Feuerraumtemperatur wesentlich, welche ebenfalls mittels der Veränderung der in den Brennraum einzubringenden Rauchgasrezirkulationsluftmenge beeinflusst wird. Mit der Entwicklung eines dementsprechenden speziellen Regelungsalgorithmus werden diese beiden wesentlichen Faktoren berücksichtigt. Eine Begünstigung der NO-Bildung infolge einer Steigerung der in den Verbrennungsprozess eingebrachten Rauchgasrezirkulationsluftmenge und der daraus resultierenden Erhöhung der Verweilzeit der Verbrennungsgase konnte nicht beobachtet werden. Ebenfalls zeigt eine Veränderung des im Feuerungsprozess herrschenden Unterdruckes, welcher Einfluss auf die Verweildauer der Verbrennungsgase in der Reaktionszone hat, keine Auswirkung an den vorhandenen NO_X-Bildungsraten. Auch mit der Veränderung der Rostlaufzeiten, mit welchen die Transportgeschwindigkeit des Brennstoffes innerhalb des Feuerraumes bestimmt wird, kann keine Beeinflussung des Emissionsverhaltes der betrachteten Verrennungsanlage ermittelt werden.

Aufgrund der im vorliegenden Verbrennungsprozess vorhandenen komplexen Zusammenhänge wurde die zur Entwicklung von emissionsbasierenden Regelungsalgorithmen, aus der im Zuge durch die Aufnahme von Sprungantworten durchgeführten Systemanalyse, die Methode der PTn-Approximation angewendet. Ein Vergleich von der im Zeitbereich durchgeführten Simulation der entwickelten emissionsbasierenden Regelungsalgorithmen, welche mit der Simulationssoftware „Matlab-Simulink“ durchgeführt wurde, mit dem Verhalten nach erfolgter Implementierung der Regelungsalgorithmen an der sich in Betrieb befindlichen Versuchsanlage, zeigt ein nahezu identisches dynamisches sowie statisches Verhalten der Regelkreise. Durch diese Gegebenheit wurde eine ausreichend genaue Modellierung der betrachteten emissionsbasierenden Regelkreise festgestellt. Nachteilig sind hingegen die zur permanenten Erfassung der emittierten CO- und NO_X-Konzentrationen anfallenden Investitionskosten für die dafür erforderlichen Messsensoriken und den damit verbundenen andauernd durchzuführenden Kalibrierungsmessungen und Wartungstätigkeiten. Durch eine ständige Herabsetzung der verordneten Emissionsgrenzwerte und die dabei geltende permanente Nachweispflicht werden kontinuierliche Emissionsmessungen in der zukünftigen Betriebsweise von Verbrennungsanlagen jedoch vermehrt zum Einsatz kommen. Durch eine davon abhängige intelligente Prozessregelung des Feuerungsprozesses kann damit nachhaltig eine Reduktion der emittierten NO_X- sowie CO-Konzentrationen bei der Sicherstellung eines optimalen Feuerungswirkungsgrades erreicht werden.

LITERATUR

Kaltschmitt M.; Hartmann H.; Hofbauer H. (2009): Energie aus Biomasse, 2. Auflage, Springer Verlag, ISBN 978-3-540-85094-6

Umweltbundesamt (2015): Grenz-, Ziel- und Schwellenwerte, http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftguete_aktuell/grenzwerte/, abgerufen am 18.04.2016 um 15:30

Kontaktdaten Autor(en):
Markus Jeitler
Altenberg 39
8295 St. Johann in der Haide
E-Mail: markus.jeitler@outlook.de

Christian Wartha
FH Burgenland GmbH
Steinamangerstrasse 21
7423 Pinkafeld
E-Mail: christian.wartha@fh-burgenland.at