

Oszillierende Verbrennung als Primärmaßnahme zur Stickoxidminderung in Rostfeuerungen

Krasimir Aleksandrov¹, Hans-Joachim Gehrman^{1*}, Manuela Hauser¹, Dieter Stapf¹, Bo Jäger², Siegmart Wirtz², Viktor Scherer², Gregor Pollmeier³, Philipp Danz⁴

*hans-joachim.gehrman@kit.edu

¹ *Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland*

² *Lehrstuhl für Energieanlagen und Energieprozesstechnik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44780 Bochum, Deutschland*

³ *POLZENITH GmbH Co. KG, An der Heller 22, 33758 Schloß Holte-Stukenbrock, Deutschland*
⁴ *bd Energie- und Umwelttechnik GmbH, Otto-Schott-Str. 5, 99427 Weimar, Deutschland*

Abstract

Derzeit werden von Biomassefeuerungsanlagen ca. 40 000 t Stickoxide (NO_x) pro Jahr emittiert. NO_x ist so wie CO₂ klimawirksam. Diese Menge entspricht einem CO₂-Äquivalent von 400 000 t pro Jahr. Die Grenzwerte für NO_x Emissionen werden stetig verschärft. Ohne technische Innovation ist es nur mit einem größeren wirtschaftlichen Aufwand möglich, die neuen Grenzwerte (z. B. nach der Technischen Anleitung Luft (TA Luft)) von 400 mg/m³ (bezogen auf einen Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas von 11 %. [1])

Diese Veröffentlichung präsentiert eine technische Primärmaßnahme zur NO_x Minimierung, die auf einer oszillierenden Verbrennungsluftzufuhr basiert. Eine Primärmaßnahme ist im Vergleich zu einer Sekundärmaßnahme ökologisch und ökonomisch attraktiver, da sie unmittelbar in den Verbrennungsprozess eingreift. Das Verfahren ist kostengünstig realisierbar und verspricht einen Kostenvorteil von rund 50 % im Vergleich zu konventionellen Verfahren. Zugleich wird durch den entfallenden Stoff- und Energieaufwand in der Sekundärmaßnahme die Energieeffizienz des Gesamtverfahrens verbessert.

Einführung

Aktuell gibt es auf dem Altholzmarkt eine große Nachfrage, die durch die Altholz-Branche nicht bereitgestellt werden kann [2], entsprechend hoch sind die Preise. Vor dem Hintergrund der Diskussionen um den Beitrag der energetischen Verwertung von Holz im Rahmen von „RED III“ der EU, bei der diese Form der Nutzung für Anlagen mit einer Leistung größer 5 MW als nicht nachhaltig klassifiziert ist [3], würde den Betrieb von Anlagen zur Biomasseverbrennung mangels Förderung weiter verteuern. Deshalb sind Maßnahmen zur Minderung von Stickoxiden, die keine Sekundärmaßnahmen erfordern, eine ökonomisch attraktive Möglichkeit.

In der Vergangenheit hat die oszillierende Verbrennung als primäre NO_x-Minderungsmaßnahme das Interesse vieler Forscher gewonnen [4-7]. Das Ergebnis einer Feldstudie von 1996 bis 2003 zur oszillierenden Verbrennung mit Gasflammen [8] zeigt eine signifikante Reduktion der NO_x-Emissionen von 31-67 %. Die Ergebnisse wurden für andere Verbrennungssysteme bestätigt.

Während konventionelle Verfahren teure Katalysatoren und Reduktionsmittel (SCR- und SNCR-Verfahren) benötigen, macht sich die Verbrennungsluft-Oszillation zunutze, dass eine Verbrennungsstufung nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich erfolgen kann. Gleichzeitig wird die Energieeffizienz verbessert (keine Aufwärmung von Katalysatoren bzw. keine Verdampfung von Ammoniak notwendig, kein Ammoniak schlupf).

Das vorgestellte Forschungsvorhaben hat sich als Ziel gesetzt die Entwicklung eines Verfahrens zur Minderung der NO_x-Emissionen aus Biomassefeuerungen im Leistungsbereich bis 20 MWth, das sowohl in Neuanlagen als auch in Bestandsanlagen implementiert werden kann. Die angestrebte technische Lösung ist eine Primärmaßnahme und basiert auf einer oszillierenden Verbrennungsluftzufuhr. Kann in der zweiten Stufe insbesondere Stickoxid durch eine geeignete Wahl

der Gaszusammensetzung und der zugeführten Mengen (Stöchiometrie) von Sekundärluft in den Brennraum reduziert werden. Eine Verstärkung des Effekts soll nun durch die Oszillation der Verbrennungsluft erreicht werden, da sie einer weiteren, zeitlichen Stufung entspricht, die dem örtlich getrennten Primär- bzw. Sekundärluftstrom aufgeprägt werden soll.

NO_x – Bildung bei Verbrennungsprozessen

Die Bildung von NO_x-Emissionen ist abhängig von der Temperatur des Verbrennungsprozesses und der Zusammensetzung des Brennstoffs und Oxidationsmittel.

Die Entstehung von thermischem NO_x ist abhängig von der Temperatur im Brennraum (lokale Temperaturmaxima), der Sauerstoffkonzentration während des Verbrennungsprozesses, sowie den Aufenthaltszeiten in den heißen Zonen. Stickstoffverbindungen wie z. B. HCN oder NH₃ (z. B. in Gichtgasen) sind im Brennstoff enthalten und sind verantwortlich für die Bildung des Brennstoff-NO_x [9].

Eine andere relevante Schadstoffspezies, ist N₂O (Lachgas, Treibhausgas) [10]. N₂O kann entweder direkt aus molekularem Stickstoff, Sauerstoff und einem inerten Stoßparameter unter erhöhtem Druck entstehen oder über die Reaktion von NH_i-Radikalen mit NO unter Freisetzung von H₂. Bei höheren Temperaturen N₂O kann zu N₂ zerfallen oder kann mit Sauerstoff weiter zu NO reagieren [8].

Bei Temperaturen höher als 1300°C O₂ dissoziiert zu atomarem O. Diese reagiert mit N₂ zu NO und führt zu einer deutlichen Zunahme von NO.

Experimentelle Untersuchungen zur NO_x-Minderung mittels Oszillation unter kontrollierten Bedingungen an der Versuchsanlage KLEAA

Produktionsabfälle aus der Spanplatten- und Möbelindustrie weisen im Vergleich zu Naturholz einen hohen Brennstoff-Stickstoffgehalt auf. Deshalb wurde in diesem Projekt auf diese Reststoffe zurückgegriffen, die bei der Firma Polzenith zur Wärmebereitstellung vor Ort eingesetzt werden. Der Brennstoff ist im Hinblick auf seine Partikelgrößenverteilung nicht homogen und enthält einen relativ hohen Feinanteil mit fast 30 Ma.-% kleiner 1 mm. Dieser hohe Feinanteil führte bei Verbrennungsversuchen an der Versuchsanlage KLEAA zu einem ungleichmäßigen Abbrandverhalten mit stark schwankenden Gaskonzentrationen, so dass ein stabiler Vergasungsbetrieb nicht möglich war. Dieser ist jedoch Voraussetzung für eine oszillierende Betriebsweise.

Um den Effekt der Stickoxidminderung auch für Brennstoffe mit niedrigerem Stickstoffgehalt nachzuweisen, wurde als Referenzbrennstoff handelsübliche Holzpellets eingesetzt. Die Elementar- und Immediatanalysen mit Schüttdichte und Heizwert für beide Brennstoffe sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. Brennstoffanalysen.

Ma.-%	Abfallholz	Holzpellets
Wasser	5,20	7,60
Asche	1,10	0,30
Flüchtige	76,40	77,80
Koks	18,30	14,50
C _{fix}	17,20	14,20
C	46,90	47,10
H	5,78	5,80
N	4,00	0,12
O _{diff}	36,83	39,07
S _{gesamt}	0,03	0,009
Cl _{gesamt}	0,6	0,006
Summe	100,00	100,00
Schüttdichte [kg/m ³]	250	300
Heizwert [MJ/kg]	17,2	17,3

Im Wesentlichen unterscheiden sich beide Brennstoffe nur durch den Stickstoffgehalt und C_{fix}, alle übrigen verbrennungsrelevanten Parameter sind etwa gleich groß.

An der Laboranlage wurden beide Brennstoffe hinsichtlich ihres Abbrandverhaltens charakterisiert, in der Anlage bei Polzenith wurde nur das Altholz verbrannt.

Um eine Frequenzanpassung der pulsierenden Luftströme zu gewährleisten, wurde die Versuchsanlage KLEAA mit einem Quetschventil ausgerüstet (Abbildung 1). Da die Pulsation der Verbrennungsluft in der sekundären Verbrennungsstufe vorgesehen wurde, wurde das Quetschventil direkt vor der Sekundärluftzuführung angebracht. Die genaue Positionierung wurde mit Polzenith abgestimmt.

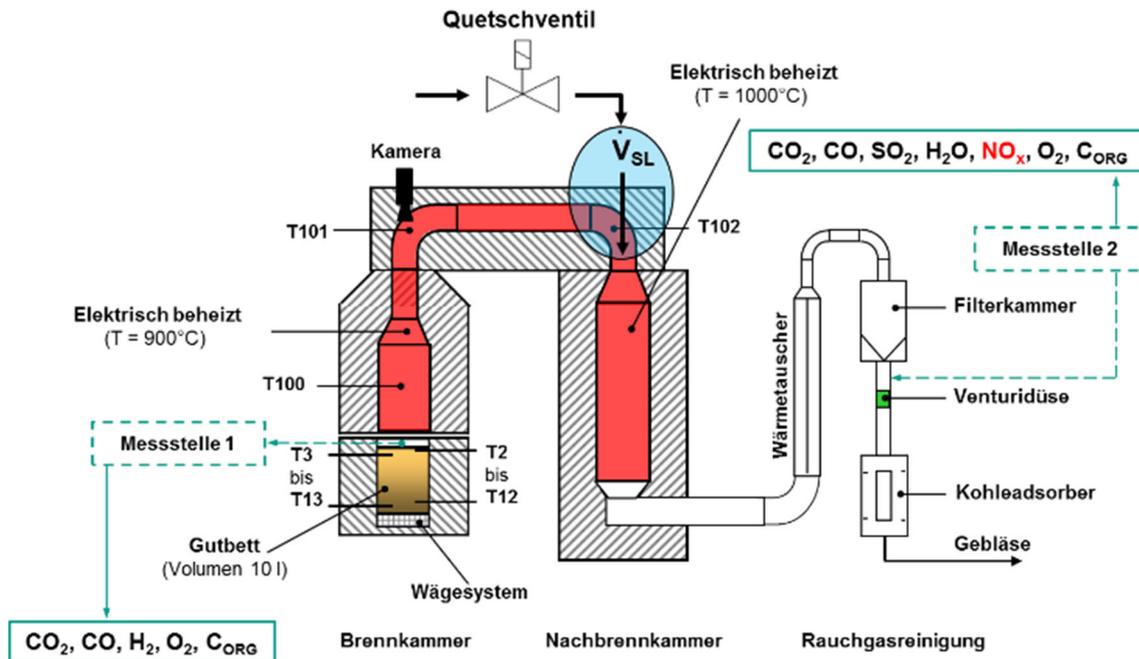


Abbildung 1. Schematische Darstellung der Versuchsanlage KLEAA. Anordnung des Quetschventils vor der Sekundärluftzuführung.

Die Brennstoffe (Altholz und die Referenzholzpellets) wurden in den Brennstofftopf auf eine Höhe von etwa 250 mm eingefüllt. Der Brennstofftopf ist auf einer Wägezelle befestigt. Über einen Spiralschlauch wurde die Primärluft mit 10 m³/h dem Topf von unten über eine Sintermetallplatte ohne Vorwärmung zugeführt. Zur Ermittlung der Temperaturen im Brennbett sind insgesamt 13 Thermoelemente über der Höhe des Brennstoffbettes gegenüberliegend versetzt in einem Abstand von jeweils 20 mm angeordnet. Oberhalb des Gutbettes wurde über eine wassergekühlte Sonde die Konzentrationen von H₂, C_{org}, CO₂, CO und O₂ im Rauchgas bestimmt. Wasserdampf (H₂O), CO, NO_x und SO₂ wurden im Reingas nach dem Gewebefilter (Messstelle 2, Abb. 1) gemessen. Die Feuerraumtemperatur lag bei 900 °C. Die Sekundärluft (25 m³/h) wurde am Kopf der Nachbrennkammer radial eingeblasen (Abb. 1). Mit Hilfe des eingebauten Quetschventils wurden Oszillationsfrequenzen von 0,25 Hz, 0,5 Hz und 1 Hz eingestellt. Die Referenzversuche wurden jeweils ohne Oszillation (Frequenz 0 Hz) durchgeführt. Um das Verbrennungsverhalten mit und ohne Oszillation vergleichen zu können, wurden für die jeweiligen Versuche entsprechende Kennzahlen, wie z. B. die Zündrate [11], die das Verbrennungsverhalten beschreiben, ermittelt. Sie sind für die jeweiligen Brennstoffe charakteristisch und reproduzierbar. In den durchgeführten Versuchen wurde nur die Sekundärluft oszilliert, weil beim Vorversuch festgestellt wurde, dass eine Primärluftoszillation nur geringfügig auf die Stickoxidminderung auswirkt.

Die Versuche wurden mit Altholz einmal ohne und einmal mit Oszillation durchgeführt. Sobald der quasi-stationäre Zustand nach der Zündung erreicht war, wurde die Oszillation der Sekundärluft mit 1 Hz aufgeprägt. Sobald die Zündfront den Gutbettboden (Rostboden) erreicht hat (in diesem Fall nach ca. 30 min), wurde die Oszillation wieder abgestellt. Mit 1 Hz gepulster Sekundärluft sank die NO_x-Konzentration (normiert auf 11 Vol.-% O₂) um etwa 16 %, von 242 mg/m³tr ohne Oszillation (Abbildung 2) auf 204 mg/m³tr. mit Oszillation (Abbildung 3).

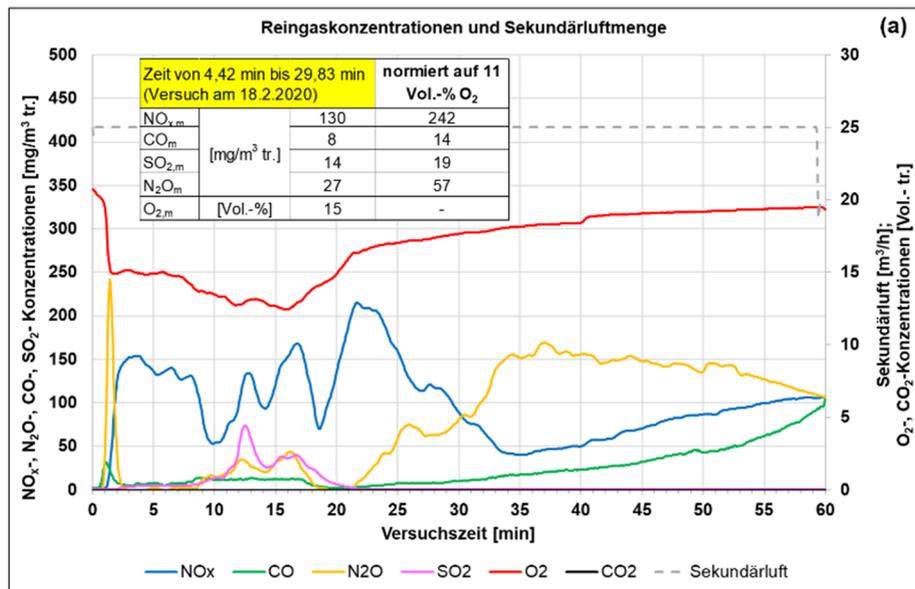


Abbildung 2. Rauchgaskonzentrationen und Sekundärluftmengen bei Verbrennung von Altholz ohne Oszillation (Referenz).

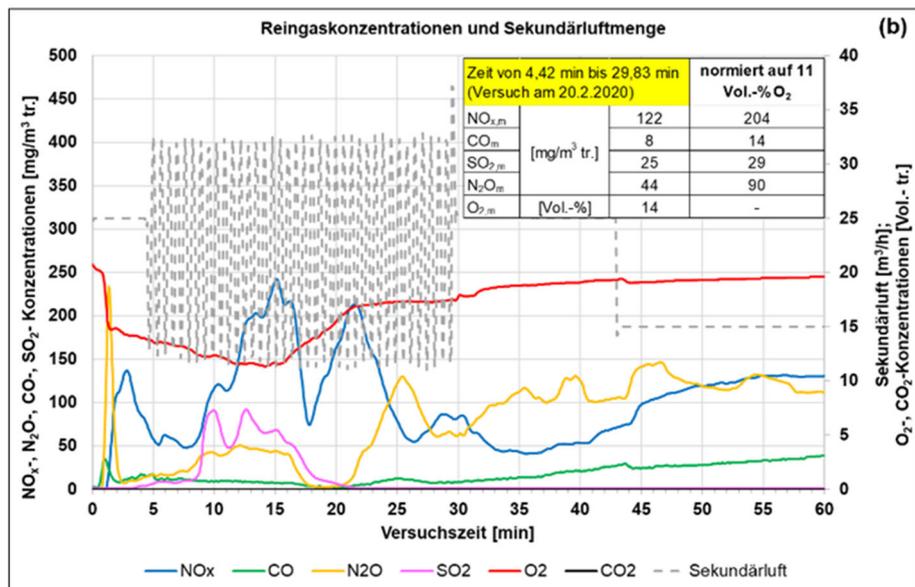


Abbildung 3. Rauchgaskonzentrationen und Sekundärluftmengen bei Verbrennung von Altholz mit 1 Hz Oszillation der Sekundärluft; CO₂-Erfassung während der Versuch defekt.

Das Altholz zeichnet sich durch ein ungleichmäßiges Zünd- und Abbrandverhalten aus (Abbildung 4), weshalb die Kennzahlen für diesen Brennstoff auch um bis zu 30 % variieren können. Es ist demnach sicherzustellen, dass in der ersten Verbrennungsstufe möglichst konstante Vergasungsbedingungen mit wenig Restsauerstoffgehalt eingestellt werden können, um eine deutliche Stickoxidreduktion durch Oszillation der Sekundärluft zu realisieren.

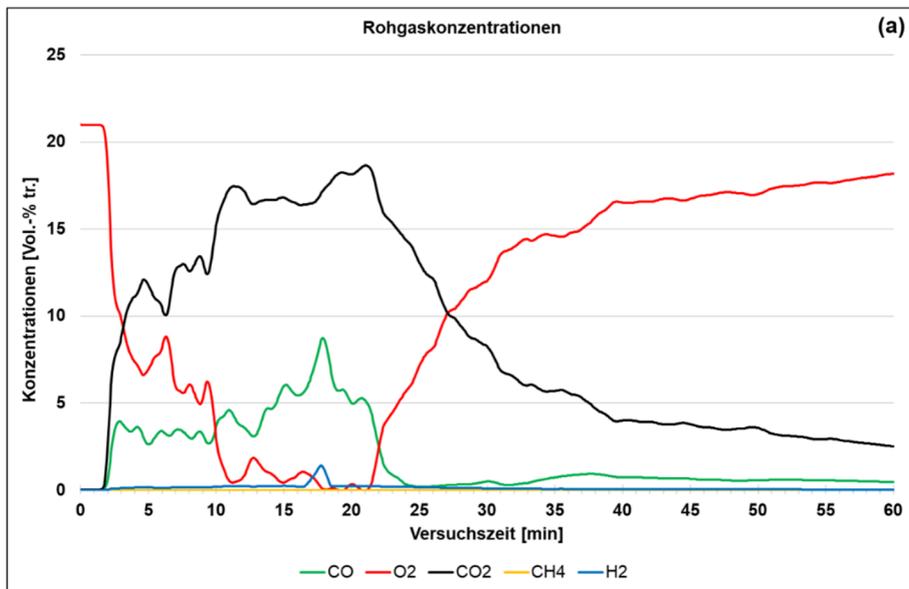


Abbildung 4. Rauchgaskonzentrationen im Rohgas oberhalb des Gutbettes bei Verbrennung von Altholz ohne Oszillation.

Für Brennstoffe mit einem hohen Stickstoffgehalt im Prozent-Bereich liefert das Verfahren sehr gute Reduktionspotentiale. Die Frage ist jedoch, wie stark hängt das Reduktionspotential vom Stickstoffgehalt ab? Um hier eine Antwort zu erzielen, wurden abschließend im Festbettreaktor Versuche mit Naturholzpellets mit einem Stickstoffgehalt von 0,12 Ma.-% durchgeführt. Gemäß Abbildung 5 und Abbildung 6 lassen sich immerhin noch rund 30 % der Stickoxide durch die oszillierende Fahrweise mindern.

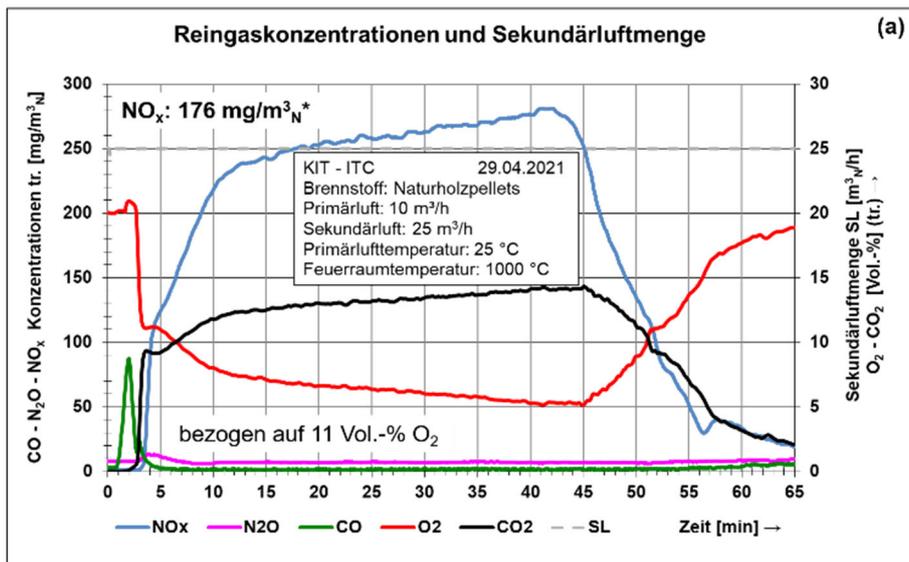


Abbildung 5. Rauchgaskonzentrationen und Sekundärluftmengen bei Verbrennung von Naturholzpellets ohne Oszillation (Referenz).

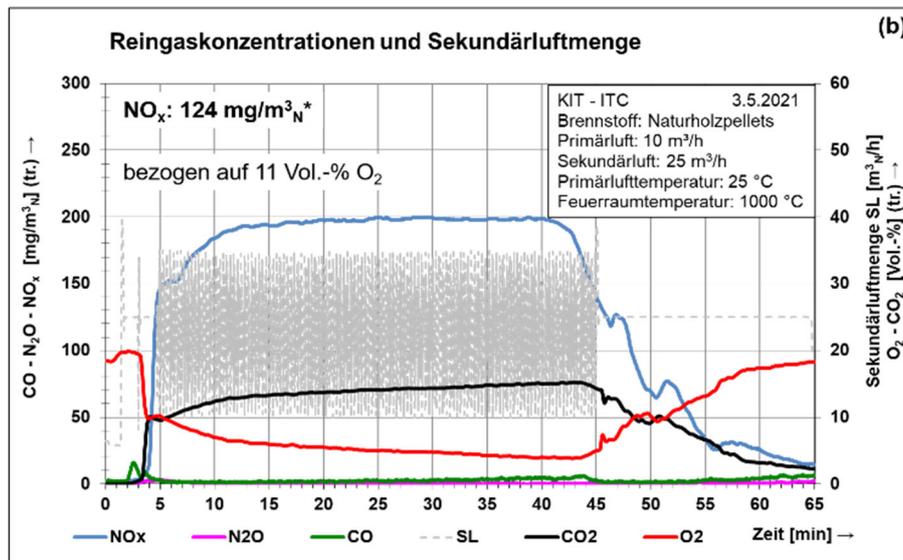


Abbildung 6. Rauchgaskonzentrationen und Sekundärluftmengen bei Verbrennung von Naturholzpellets mit 1 Hz Oszillation der Sekundärluft.

Validierung des Verfahrens zu NO_x-Minderung mittels Oszillation an der Hackschnitzelfeuerung der Firma Polzenith

Um den Verfahren zu NO_x-Minderung mittels Oszillation unter realen Bedingungen zu validieren, wurde eine selbst rotierende Absperrklappe – Pulsator entwickelt. Diese sollte der Oszillation des Sekundärbrennluftes zu gewährleisten.

Der Pulsator ausgeführt in Stahl und mit einem Frequenzumrichter, sowie Kettenantrieb ausgestattet (Abbildung 7) wurde in die Sekundärluftzufuhr der Versuchsanlage bei Polzenith (Abbildung 8) eingebaut.



Abbildung 7. Der Pulsator im eingebauten Zustand (Bildmitte).

Die gewählte Form der Ausführung ist auch für den späteren industriellen Einsatz geeignet (mit zusätzlicher Abdeckung für den Kettenantrieb). Auch das Nachrüsten in Altanlagen ist durch die geringe Baugröße und Robustheit der Ausführung möglich. Über eine Drehzahlregelung kann die Rotation zwischen 0 und 2 Hz feinjustiert werden. Eine Implementierung in bestehende Schaltschränke ist möglich.

Auf einen Einbau in die Primärluftzufuhr wurde verzichtet, da hier kein NO_x-Minderungseffekt erwartet wird. Notwendige bauliche Veränderungen an der Verbrennungsanlage (zusätzlicher Frequenzumrichter, Wechsel von Mitteldruckgebläse auf Hochdruckgebläse, Anpassung der Steuerung)

wurden durchgeführt. Der Einbau erfolgt so, dass größtmögliche Variabilität hinsichtlich Anströmung, Abströmung, Kanalquerschnitten und Steg-Geometrie vorliegt.

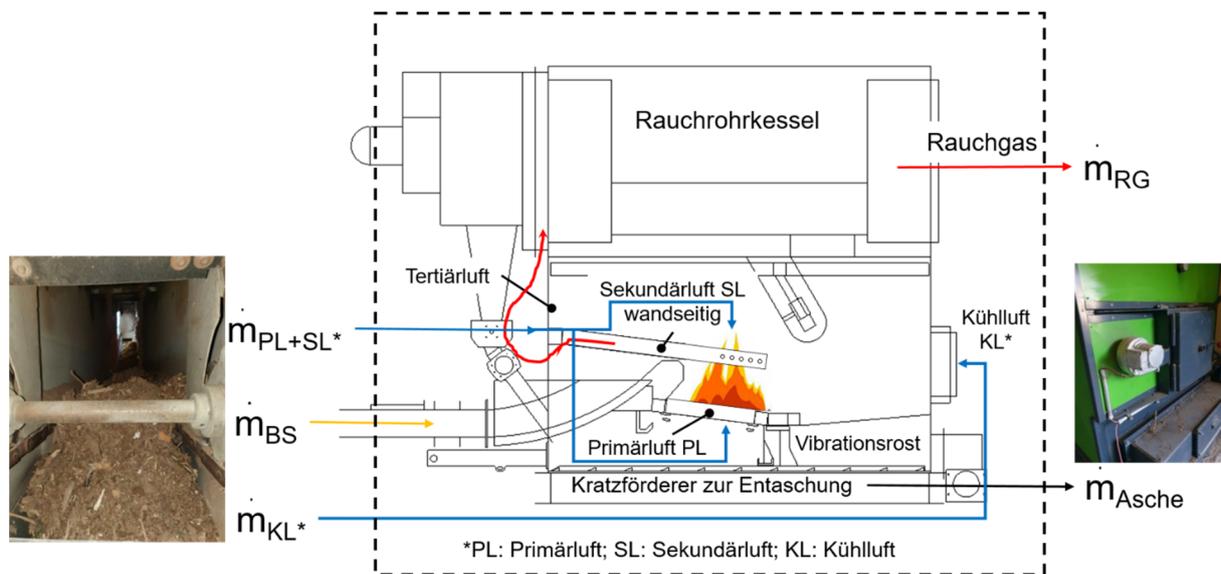


Abbildung 8. Schematische Darstellung der Hackschnitzelfeuerung bei Polzenith, 400 kWth.

Die Anlage besteht aus Dosiereinheit, die den Brennstoff vom überdachten Außenlager über ein Förderband durch einen Tunnel (Abb. 8. links) zum Stöbel liefert. Von dort wird das Material in den Ofen auf den Vibrationsrost geschoben. Durch Vibration wird der Brennstoff geschürt und gelangt schließlich als Asche über den Kratzförderer in einen Sammelbehälter. Die Verbrennungsluft wird über zwei Gebläse für Primär- und Sekundärluft aus der Halle angesaugt und kann über die Drehzahl geregelt werden. Wie weiter unten noch ausgeführt wird, wurde der Volumenstrom mit einer Messsonde für die Versuchsfahrten manuell ermittelt. Die Rauchgase durchströmen anschließend den Rauchrohrkessel und werden über einen Kamin abgeleitet. In der Abbildung ist mit der gestrichelten Linie der Bilanzrahmen für die Massenbilanz festgelegt.

Bei Polzenith wurden Experimente mit Schnittresten aus der Holzbau-Industrie zum Einfluss der Oszillation auf die NO_x -Konzentrationen im Abgas durchgeführt. Die Pilotanlage dient zur Bereitstellung von Warmwasser für Heizung und Nutzung. Damit gibt es keine über einen längeren Zeitraum, z. B. von 3 bis 4 Stunden, konstanten Betrieb. Daher ist die Bilanzierung und Korrelation der gemessenen NO_x -Konzentrationen durch vergleichbare Betriebsparameter eher schwierig. Deshalb wurde im Folgenden neben der „klassischen“ Darstellung der NO -Konzentrationen, bezogen auf 11 Vol.-% Sauerstoff im Abgas in mg/m^3 , auch eine leistungsbezogene NO -Konzentration in mg/kJ eingeführt. Diese Umrechnung erfolgt über die auf 11 Vol.-% O_2 bezogene NO -Konzentration multipliziert mit dem Rauchgasmassenstrom und bezogen auf die thermische Leistung der Anlage (Produkt aus Brennstoffmassenstrom und Heizwert).

Abbildung 9 zeigt den Verlauf der NO -Konzentration für eine Einstellung ohne Pulsator und mit Pulsator bei einer Frequenz von 0,75 Hz sowie die entsprechenden Mittelwerte über den jeweiligen Zeitraum für NO und CO . Durch den Betrieb des Pulsators, der die Sekundärluft mit einer Frequenz von 0,75 Hz unterbricht, kann eine Reduktion der NO -Konzentrationen von rund 3,5 % erzeugt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine wesentliche Voraussetzung für eine hohe Reduktionseffizienz die unterstöchiometrische Verbrennung des Brennstoffes auf dem Rost mit der Primärluft nicht gegeben ist, wie Abbildung 10 zeigt. Interessanterweise nimmt auch die CO -Konzentration ab, was darauf zurückzuführen ist, dass die Pulsation die Vermischung der Rauchgase mit der Luft verbessert.

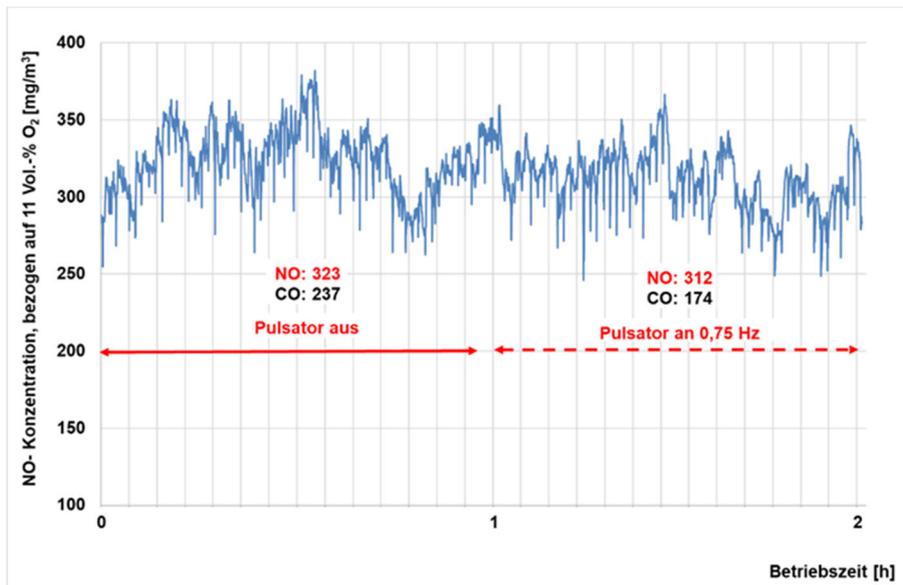


Abbildung 9. NO-Konzentrationen bei Versuchen ohne und mit Pulsator sowie Mittelwerte für NO und CO

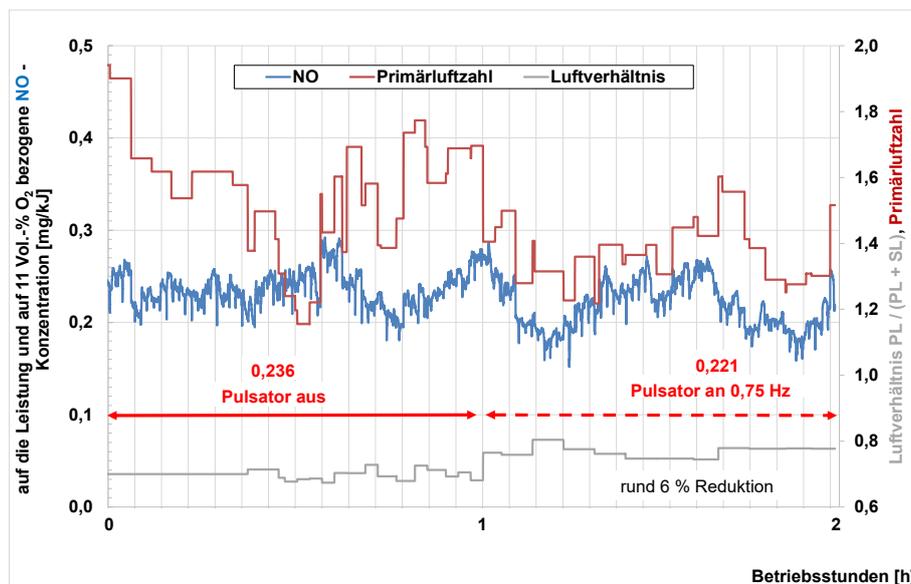


Abbildung 10. Auf den Energieinhalt bezogene NO-Konzentration, Primärluftzahl und Luftverhältnis.

Die Primärluftzahl λ_p wird aus dem Verhältnis der Primärluftmenge und dem Produkt aus Mindestluftbedarf (5,15 kg Luft/kg Brennstoff) und der Brennstoffmenge ermittelt. Ist diese < 1 (Vergasung), dann ist eine wesentliche Bedingung für die Funktionsweise der oszillierenden Verbrennung gegeben. Zusätzlich ist das Verhältnis von Primärluft zu der Gesamtluft aus Primär- und Sekundärluft dargestellt. Dies zeigt an, an welcher Stelle die größte Luftmenge zugeführt wird.

Für den gesamten betrachteten Versuchszeitraum erreicht die Primärluftzahl nicht < 1 , d. h. es gibt keine Vergasungsbedingungen auf dem Rost, denn die Hauptluft wird über die Primärluft zugegeben. Das Verhältnis liegt zwischen 70 und 75 %. Dennoch können leichte Effekte beobachtet werden. Die Reduktion resultiert vermutlich aus lokalen reduzierenden Bedingungen, die hier durch die Mittelung nicht abgebildet werden können. Durch den Bezug auf die thermische Leistung wird die NO-Konzentration um 6 % im Pulsationsbetrieb im Vergleich zur nicht pulsierenden Fahrweise abgesenkt.

In einem weiteren Versuch wurden unterschiedliche Pulsatoranforderungen eingestellt und es wurde versucht, das Luftverhältnis zugunsten der Sekundärluft zu verschieben.

Um den Einfluss der Pulsationsfrequenz auf die NO-Minderung zu untersuchen, wurden am zweiten Versuchstag unterschiedliche Frequenzen am Pulsator eingestellt und die NO-Konzentrationen im Abgasrohr gemessen. Abbildung 11 zeigt die entsprechenden NO-Konzentrationen in mg/m^3 .

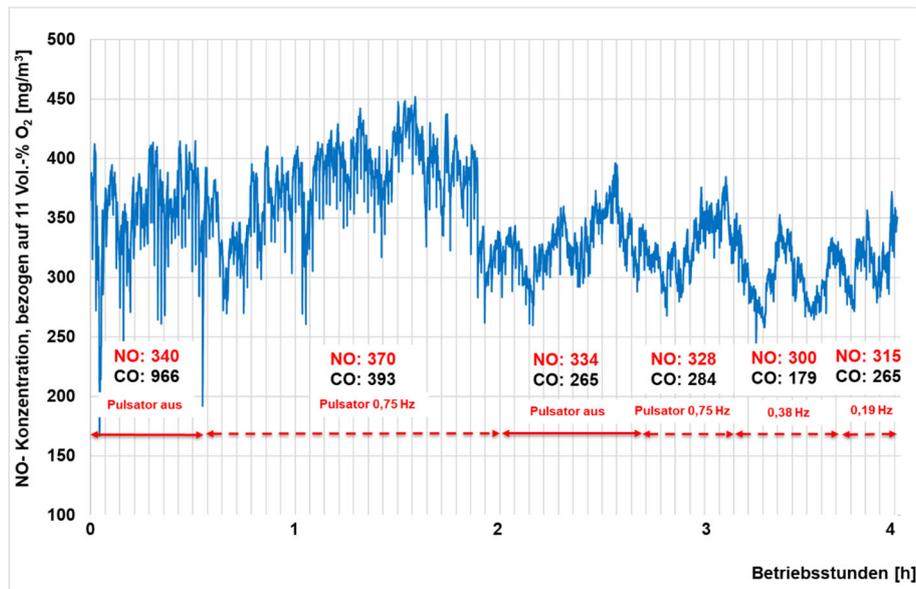


Abbildung 11. NO- bzw. CO- Konzentrationen bei Versuchen ohne und mit Pulsator.

Wird der größte Unterschied zwischen den NO-Konzentrationen ohne und mit Oszillation betrachtet, ergibt sich eine maximale NO-Reduktion von $340 \text{ mg}/\text{m}^3$ auf $300 \text{ mg}/\text{m}^3$ mit etwa 12 %. Auch hier zeigt sich tendenziell, dass mit Reduktion der NO-Konzentrationen sich auch CO aufgrund der besseren Vermischung mindern lässt.

Trotz der Umverteilung der Primär- und Sekundärluft konnten nur kurze Zeiten mit Vergasungsbedingungen auf dem Rost eingestellt werden, wie in Abbildung 12 zu erkennen ist.

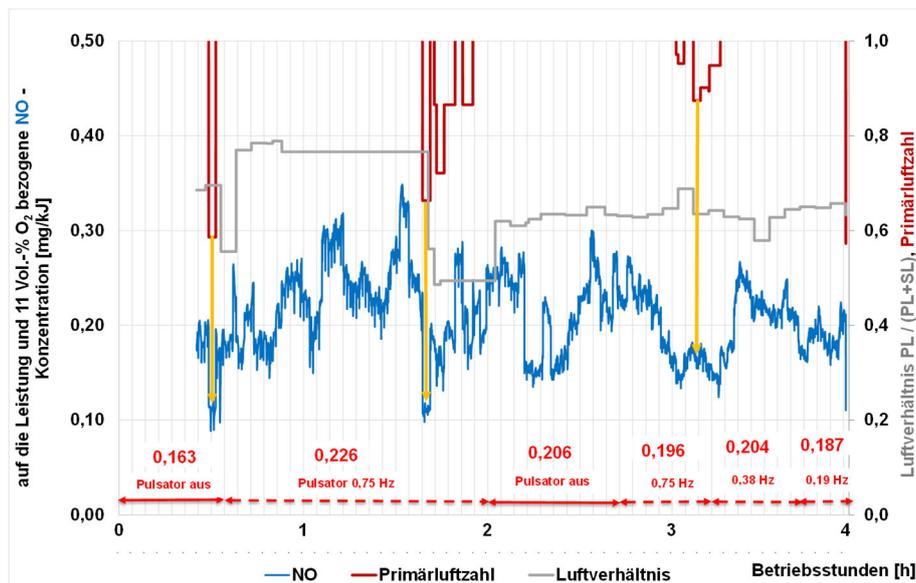


Abbildung 12. Auf den Energieinhalt bezogene NO-Konzentration, Primärluftzahl und Luftverhältnis nach Umverteilung der Luftmengen von 75/25 auf 65/35 (Anteile Sekundärluft / Primärluft)

In den kurzen Zeiträumen mit Vergasungsbedingungen (Primärluftzahl < 1) sinkt die auf den Energieinhalt bezogene NO-Konzentration parallel deutlich ab, was die gelben Pfeile andeuten. Leider sind diese Zeitabschnitte zu kurz, um einen systematischen Vergleich von Einstellungen ohne Pulsation

und mit Pulsation zu gewinnen. Bei der ursprünglichen Luftverteilung mit rund 75% Anteil an der Primärluft verringert sich bei der Pulsation mit 0,75 Hz die spezifische NO-Konzentration von 0,236 auf 0,226 mg/kJ, was etwa einer Reduktion von etwa 4 % entspricht. Der Reduktionsgrad ist so gering, dass er eher „im Grundrauschen“ der Messgenauigkeiten liegt. In der Einstellung mit verringerter Primärluftmenge von rund 65 % gibt es leider keine vergleichbaren Zeitabschnitte ohne und mit Pulsation mit einer Primärluftzahl < 1. Zieht man jedoch den Zeitabschnitt ohne Pulsation in den Vergleich mit 0,19 Hz so erreicht man eine Reduktion von 0,206 mg/kJ NO auf 0,187 mg/kJ mit rund 9 %. Aufgrund der schlechteren Durchlüftung des Brennstoffs auf dem Rost kam es allerdings zu einer Brennstoffanhäufung, so dass diese Einstellung wieder zurückgenommen wurde. Für eine Übertragung der guten Reduktionsergebnisse, die im Laborreaktor erzielt wurden, muss zukünftig eine Anlage ausgewählt werden, bei der Primär- und Sekundärzone räumlich so weit voneinander getrennt sind, dass der Feststoff stabil vergast werden kann und die Gase mit der oszillierenden Sekundärluft umgesetzt werden können.

Zusammenfassung

In diesem Projekt wurde eine technische Primärmaßnahme zur NO_x-Minimierung entwickelt, die auf einer oszillierenden Verbrennungsluftzufuhr basiert. Das Forschungsziel war die Übertragung der Verbrennungsluft-Oszillation auf zweistufige Verbrennungsprozesse kleiner und mittelgroßer Biomassefeuerungen bis 20 MWth. Die oszillierende Verbrennung ist als zeitlich gestufte Verbrennung zu verstehen, bei der entweder der Brennstoff oder die Sekundärluftzufuhr oszilliert wird. Die oszillierende Verbrennung fester Brennstoffe wird wesentlich durch den Brennstoffstickstoff beeinflusst. Grundlage ist die oszillierende Zugabe von Brennstoff oder Luft in die Reaktionszone der Flamme, die eine Änderung der lokalen Stöchiometrie bewirkt. Diese Primärmaßnahme ist im Vergleich zu einer Sekundärmaßnahme ökologisch und ökonomisch attraktiver. Das Verfahren ist kostengünstig realisierbar und verspricht einen Kostenvorteil von rund 50 % im Vergleich zu konventionellen Verfahren.

Literatur

- [1] *Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft*, 18 Aug., 2021
- [2] EUWID Recycling und Entsorgung: *Es geht nicht mehr um den Preis, es geht nur noch um Mengen*, Marktbericht für Altholz: Stark steigende Altholzpreise durch geringe Mengen und hohe Strompreise; Ausgabe 4/2022.
- [3] C.A.R.M.E.N. e.V.: *Verschärfte Nachhaltigkeitskriterien für Energieholz in der RED III*; Straubing, 31.08.2022.
- [4] Berichte aus dem TFZ: *Einflussfaktoren auf die NO_x-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt*, Straubing, März 2020.
- [5] Gehrmann, H.-J., et al.: *Oscillating Combustion - Primary Measure to Reduce Nitrogen Oxide in a Grate Furnace*, Experiments and Simulations Processes, 9(12), 2021.
- [6] Cho, H.C., Cho K.W., and Kim H.: *NO_x Emission Characteristics in Radiant Tube Burner with Oscillating Combustion Technology*, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 32: p. 100-106, 2008.
- [7] Scherello, A., et al.: *Experimentelle Untersuchung zum Einfluss der oszillierenden Verbrennung auf die Wärmeübertragung und die Stickoxidemissionen von Gasflammen*, Abschlussbericht eines AiF-Vorhabens, Gaswärme-Institut Essen, 2002.
- [8] Technology, I.o.G.: *NO_x Emission Reduction by Oscillating combustion*, p. Medium: ED; Size: 186 pages, United States 2004.
- [9] Beckmann, M.: *Beschreibung unterschiedlicher Techniken und deren Entwicklungspotentiale zu Minderung von Stickoxiden im Abgas von Abfallverbrennungsanlagen*, Texte Bundesumweltamt, Bd. 71, S. 132, 2011.
- [10] Myhre, G., Shindell, D., et al.: *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [11] Gehrmann, H.-J., et al.: *Waste wood characterization and combustion behavior in pilot lab scale*, Journal of the Energy Institute, 93, 1634 – 1641, 2020