

Empfehlungen zur Entwicklung emissionsarmer und brennstoffflexibler Pelletöfen

Autoren:

Prof. Dr. Ingwald Obernberger, Dr. Thomas Brunner
BIOS - Bioenergiesysteme GmbH



Dr. Volker Schulte
Olsberg GmbH



Robert Mack, Dr. Hans Hartmann
Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)

Hans Martin Behr
Holz-Energie-Zentrum Olsberg GmbH



Kevin Nätebusch
Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI)



Haftungsausschluss:

Die präsentierten Empfehlungen sind Ergebnis eines wissenschaftlichen Projekts. Die Umsetzung und Nutzung der Forschungsergebnisse liegen im Ermessen jeder einzelnen Person oder jedes Unternehmens. Die Autoren übernehmen keine Haftung für die Nutzung und Umsetzung der Forschungsarbeit und der Forschungsergebnisse sowie für die Folgen der daraus resultierenden technologischen Entwicklung oder Anlagenbetrieb.

1. Ziel und Anwendungsbereich

Diese Empfehlung soll Entwickler und Hersteller von Pelletöfen bei der Konzeption besonders emissionsarmer und innerhalb der Schwankungsbreiten der Brennstoffparameter von ENplus A1-Pellets flexibler Pelletöfen unterstützen. Dies soll ausschließlich durch die Anwendung von Primärmaßnahmen (Optimierung des Verbrennungskonzeptes und der Ofenregelung) und somit ohne Anwendung von Staubabscheidern oder Katalysatoren erfolgen.

2. Definitionen und Abkürzungen

- **Primärluft:** Verbrennungsluft die durch den Rost dem Brennstoffbett zugeführt wird.
- **Rezirkuliertes Rauchgas (Rezi):** Rauchgas, das nach Ofenaustritt vom Hauptrauchgasstrom abgezweigt und in die Brennkammer rezirkuliert wird.
- **Sekundärluft:** Verbrennungsluft, die oberhalb des Brennstoffbetts in den Brenner eingebracht wird.
- **Scheibenspülluft:** Luft, die entlang der Scheibe in der Brennkammertür strömt und dazu dient, die Scheibe frei von Ablagerungen zu halten.

3. Ausgeprägte und effiziente Luftstufung – die Basis für eine besonders emissionsarme Verbrennung

Moderne Pelletöfen bauen heutzutage allgemein auf einer **gestuften Verbrennung** auf. Das heißt, dass der Brennstoff auf einem Verbrennungsrost aufgebracht wird und dort in einem ersten Schritt unter Einsatz von Primärluft brennbare gasförmige Komponenten aus dem Brennstoff freigesetzt und die zurückbleibende Holzkohle verbrannt wird. Oberhalb des Brennstoffbettes werden die brennbaren gasförmigen Komponenten dann durch Eindüsung von Sekundärluft möglichst vollständig verbrannt. Zudem wird üblicherweise Scheibenspülluft eingesetzt, die entlang des Sichtfensters in der Regel von oben nach unten strömt, sich oberhalb des Pelletbrenners in den Rauchgasstrom einmischt und somit zusätzliche Sekundärluftwirkung hat. Bei manchen Öfen wird auf die separate Einbringung von Sekundärluft verzichtet und nur die Scheibenspülluft zur Verbrennung der aus dem Brennstoffbett austretenden Gase eingesetzt. Das beschriebene Verbrennungskonzept (siehe Abbildung 1) bildet auch die Basis für die in dieser Empfehlung vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen.

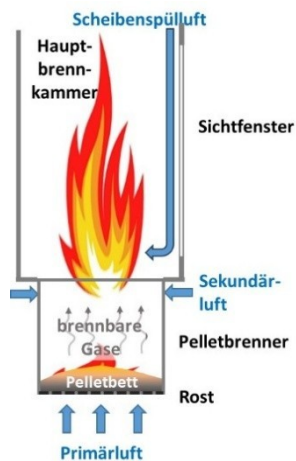


Abbildung 1: Schematische Darstellung der gestuften Verbrennung

3.1 Verbrennungsrost und Brennstoffbett

Eine **ruhige Brennstoffbettführung** bildet die Basis für eine emissionsarme Verbrennung. Wesentlich ist, dass der Verbrennungsrost zu jeder Zeit ausreichend und vor allem vollständig mit Pellets bedeckt ist und dass die Primärluft gleichmäßig (am besten über Öffnungen im Rost) aufgegeben wird. Dies sorgt für eine gleichmäßige Durchströmung des Brennstoffbettes mit Primärluft und damit zu einer gleichmäßigen Umsetzung des Brennstoffes. Außerdem wird das Aufwirbeln von Brennstoff-, Holzkohle- und Aschenpartikeln minimiert, die sonst mit den Rauchgasen aus dem Brennstoffbett ausgetragen und zu Aschenablagerungen im Wärmetauscher sowie zu Staubemissionen führen würden.

Zündluft, die z.B. über elektrische Heizelemente angesaugt und im unteren Teil des Brennstoffbettes zugeführt wird, ist ebenfalls der Primärluft zuzuordnen. Während des stationären Betriebs wirkt sich der punktuelle Lufteintrag über das Zündelement in Form lokal verstärkter Brennstoffumsetzung aus und führt zur Strahlenbildung im Brennstoffbett. Das beeinträchtigt die Gleichmäßigkeit des Bettabbrandes und führt somit zu erhöhten Emissionen. Optimal wäre es, die Luftzufuhr über das Heizelement außerhalb der Zündungsphasen zu unterbinden. Da dies mit erhöhten Kosten (eigene automatisierte Ventile oder Klappen) verbunden und somit kaum realisierbar ist, wird empfohlen, die Zündluftöffnungen und damit den Zündlufteintrag am notwendigen Minimum auszulegen.

Die **richte Wahl des Primärluft-Verhältnisses** (Anteil der Primärluft an der gesamten zugeführten Verbrennungsluft) ist dabei wesentlich. Es sollte niedrig (<50%) sein, da eine geringe Primärluftmenge folgende positive Auswirkungen hat:

- niedrige Gasgeschwindigkeiten im Brennstoffbett → weniger Staubaustrag
- niedrigere Brennstoffbetttemperaturen, da weniger Sauerstoff zur Verfügung steht → geringere Verschlackungsneigung
- Bildung einer reduzierenden Atmosphäre (Luftmangel) oberhalb des Brennstoffbettes → positive Auswirkung auf die Minderung von NO_x -Emissionen, da in reduzierender Atmosphäre bei hohen Temperaturen N-haltige Verbindungen zum Teil in elementaren Stickstoff umgewandelt werden

Die Primärluft muss aber ausreichen, um die Holzkohle vollständig zu verbrennen und ein Pelletbett mit stabiler Höhe aufzubauen. Zur **zusätzlichen Kühlung** des Brennstoffbettes kann auch rezirkuliertes Rauchgas (*Rezi*), das gemeinsam mit der Primärluft zugeführt wird, eingesetzt werden.

Da es im Zuge einer experimentellen Entwicklung eines Pelletbrenners kaum möglich ist, relevante Größen wie Primärluft- und Zündluftstrom ausreichend genau zu messen und deren Einfluss auf das Brennstoffbett zu bewerten, wird empfohlen, CFD-Simulationen (CFD = Computational Fluid Dynamics = numerische Strömungssimulation) im Zuge der Ofenentwicklung einzusetzen. Derartige Simulationen erlauben eine voroptimierte Konzeption des Brennstoffbettbereichs, erhöhen die Entwicklungssicherheit und beschleunigen den Entwicklungsprozess im Vergleich zu einer rein experimentellen Entwicklung deutlich.

3.2 Gasphasenausbrand – optimierte Sekundärlufteindüsung und optimiertes Brennkammerdesign

Im Pelletbrenner muss entsprechend Raum (Höhe) für die Ausbildung des Brennstoffbettes zur Verfügung stehen und es muss auf jedem Fall vermieden werden, dass das Brennstoffbett bis an den Rand der Sekundärluft-Eindüsung anwächst. Ein genügend großer Abstand zwischen dem Brennstoffbett und der Sekundärluft-Eindüsung

- vermeidet Rückströmungen der Sekundärluft und nicht gewollte Rückstrahlung auf das Brennstoffbett und
- schafft Volumen und Zeit für NO_x-Reduktionsreaktionen in der reduzierenden Atmosphäre über dem Brennstoffbett.

Die Sekundärluft sollte getrennt von der Scheibenspülluft zugeführt werden. Ihre Eindüsung sollte bereits vor dem Eintritt in die Hauptbrennkammer mit Sichtscheibe erfolgen, um sicherzustellen, dass Oxidationsreaktionen bei möglichst hohen Temperaturen ablaufen können. Das Sekundärluftverhältnis (Verhältnis der Summe aus Primär- und Sekundärluft zur Luftmenge, die für die vollständige Umsetzung des Brennstoffes notwendig ist) muss dabei bereits über 1 liegen, da sonst kein entsprechend hoher CO-Ausbrand erzielt werden kann.

Die **optimierte Eindüsung der Sekundärluft** ist dabei sehr wichtig und ist der Schlüssel für geringe Emissionen an CO, OGC und Rußpartikeln. Dazu ist eine optimierte Geometrie, Ausrichtung und Positionierung der Sekundärluft-Düsen relevant, da diese für eine gute Durchmischung der Sekundärluft mit den brennbaren Gasen und somit für einen annähernd vollständigen Gasphasenausbrand bei geringem Luftüberschuss und damit hohem Wirkungsgrad sorgt.

Die **Brennkammer** sollte **gut isoliert** sein um ausreichend hohe Temperaturen für vollständigen Gasphasenausbrand zu gewährleisten und hinsichtlich ihrer Geometrie so dimensioniert werden, dass ausreichend hohe Verweilzeiten für vollständigen Gasphasenausbrand zur Verfügung stehen.

Diesbezügliche Entwicklungsschritte können zwar experimentell erfolgen, es wird aber auch hier der Einsatz von modernen **CFD-Simulationen** empfohlen, da so Optimierungsschritte effizienter gesetzt und voroptimierte Prototypenkonzepte rascher erarbeitet werden können.

Je besser die genannten Aspekte umgesetzt werden, umso weniger Verbrennungsluft ist für eine vollständige Verbrennung notwendig. Mit sinkendem Verbrennungsluftverhältnis λ bzw. O₂-Gehalt im Rauchgas steigen der thermische

Wirkungsgrad der Verbrennung und auch die Verbrennungstemperatur, was den Ausbrand der Gase beschleunigt und auch den Wirkungsgrad des Pelletofens erhöht.

3.3 Scheibenspülluft

Ein ungehinderter Blick auf die Flamme ist eine wesentliche Kundenanforderung. Scheibenspülluft, die am Sichtfenster von oben nach unten entlang strömt, soll dabei als Barriere zwischen dem Rauchgas und der Scheibe dienen, und so Ablagerungen von Ruß, organischen Kohlenwasserstoffen und Staub verhindern. Der **Scheibenspülluft-Strom sollte aber so gering wie möglich** gehalten werden, da er zur Abkühlung der Brennkammer beiträgt und sich nicht so gut wie die über Düsen eingebrachte Sekundärluft in das Rauchgas einmischen lässt. Außerdem sollte die Scheibenluftansaugung entlang der Brennkammer erfolgen, um eine möglichst gute Vorwärmung der Scheibenluft vor Eintritt in die Brennkammer sicherzustellen.

Mittels **CFD-Simulationen** kann eine Lösung erreicht werden, die eine möglichst gleichmäßige Scheibenluftverteilung über die gesamte Scheibenfläche sicherstellt, was für die Vermeidung von Verschmutzungen sehr wichtig ist.

4. Was bei der Umsetzung zu beachten ist

Eine gezielt optimierte und im realen Anlagenbetrieb auch entsprechend genau eingestellte Aufteilung der Primär-, Sekundär- und Scheibenspülluft-Ströme ist ein wesentlicher Faktor für eine effiziente und kontrollierte Umsetzung des Luftstufungsprinzips.

Falschluffströme können das Konzept deutlich in seiner Effizienz mindern da sie unkontrolliert an verschiedenen Positionen in den Ofen eintreten und so zu Verschiebungen bei den eingestellten Luftverhältnissen führen.

- **Falschluff über die Entaschungstüren** z.B. verfälscht das Primärluftverhältnis (da sie in den Raum unterhalb des Rostes eintritt). Dasselbe gilt für Falschluff, die über das Zündelement in das Brennstoffbett eingebracht wird.
- **Falschluff über die Brennstoffzufuhr oder über die Ofentür** hingegen mischt sich erst in der Brennkammer in die Rauchgase ein (Sekundärluftwirkung). Dies geschieht aber im Gegensatz zur Sekundärluft, die durch Düsen eingebracht wird, ohne wesentlichen Impuls (schlechte Mischung = schlechte Wirkung).
- **Falschluff im Wärmetauscherbereich** nimmt wegen der bereits niedrigen Rauchgastemperaturen nicht an der Verbrennung teil. Sie verdünnt das Rauchgas und erschwert das gezielte Einstellen der Luftstufung in der Brennkammer.

Eine entsprechend genaue Fertigung sowie geeignete Falschlufftests an Prototypen und Seriengeräten zur Identifikation und Beseitigung potenzieller Falschluffquellen sind daher unumgängliche Maßnahmen zur effizienten Implementierung von Luftstufungskonzepten. Der Falschluffeintrag sollte dabei zumindest unter 20 % der gesamten eingebrachten Verbrennungsluft liegen, idealerweise unter 10 %.

5. Maßnahmen zur Erhöhung der Brennstoffflexibilität und zur Sicherstellung einer geregelten Heizleistung

Auch ENplus A1-Pellets unterliegen innerhalb der Norm gewissen Schwankungen wesentlicher Brennstoffparameter. Diese können einerseits die Brennstoffzusammensetzung, speziell die Gehalte an aschebildenden Elementen (im wesentlichen Ca, K, Si, Mg) sowie den Gesamtaschegehalt im Brennstoff betreffen, was Auswirkungen auf die Versinterungs-/Verschlackungsneigung der Aschen hat. Hier sollen die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Brennstoffbettkühlung (niedriges Primärluftverhältnis und Rauchgasrezirkulation) entsprechende Flexibilität schaffen.

Andererseits haben auch physikalische Parameter wie die Pelletlänge einen signifikanten Einfluss auf das Abbrandverhalten. Ein rascherer Pelletabbrand wirkt sich dabei in Form einer höheren Ofenleistung und, wenn nicht darauf reagiert wird, in Form höherer Brennkammertemperaturen und niedrigerer Verbrennungsluftverhältnisse aus. Letztere führen zu erhöhten Emissionen. Daher ist es für einen brennstoffflexiblen Ofen unumgänglich, dass schwankende Pelletqualitäten über Änderungen der Brennkammertemperatur erfasst und durch Modulation des Brennstoffzufuhr regelungstechnisch entsprechend kompensiert werden.

6. Empfohlene mess- und regeltechnische Ausrüstung

Die in dieser Empfehlung diesbezüglich beschriebenen Maßnahmen lassen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand in Pelletöfen umsetzen. Für die vorgeschlagene Leistungsregelung wird lediglich ein Brennkammertemperatursensor sowie eine stufenlos regelbare Pelletzufuhrschnecke benötigt.

Es wird empfohlen über Vorversuche mit verschiedenen Pelletsortimenten die Fördercharakteristik der Schnecke zu bestimmen, um so den Arbeitsbereich des Schneckenantriebs optimal auf die geforderte Schwankungsbreite des Brennstoffeinschubs abstimmen zu können. Über die Brennkammertemperatur kann eine entsprechende Zielleistung eingestellt werden. Das heißt, dass die Brennstoffzufuhr so angepasst wird, dass eine für die aktuelle Leistungsstufe des Ofens charakteristische Brennkammertemperatur gehalten werden kann. Dadurch wird ein "Überfahren" des Ofens, das zu deutlich erhöhten CO und Staubemissionen führt, vermieden.

Die Einstellung optimaler Luftverhältnisse im Brennstoffbett und in der Brennkammer kann über entsprechende Stellorgane in den Zuluftleitungen und die Messung des Brennkammerunterdrucks erfolgen. Die Drehzahl des Rauchgasventilators wird dabei so angepasst, dass ein lastabhängig vorgegebener Unterdruck eingehalten wird. Die Positionen der Stellorgane (z.B.: Klappen, Ventile, Schieber) zur Einstellung der gewünschten Luftstufungseinstellungen können im Zuge von Prototypentests beim Hersteller bestimmt und fest voreingestellt werden. So kann der kostspielige Einbau separater regelbarer Klappen für die einzelnen Zuluftströme vermieden und trotzdem die vorgesehene Luftstufung bei Nennlast und Teillast sichergestellt werden.

7. Schlussbemerkung

Die vorliegenden Empfehlungen zur Entwicklung emissionsarmer und Brennstoffflexibler Pelletöfen stellen einen praxisnahen Leitfaden dar. Sie berücksichtigt aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse und Erfahrungen aus umfangreichen

Praxisuntersuchungen. Die konsequente Umsetzung dieser Empfehlungen trägt wesentlich zur Reduktion von Emissionen bei erhöhter Brennstoffflexibilität, zur Steigerung der Effizienz und zur Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs von neu entwickelten Pelletöfen bei.

Alle hier beschriebenen Punkte sind aus den Forschungsergebnissen der FNR-Projekte "FuturePelletSpec1" und "FuturePelletSpec 2" abgeleitet. Beide Projekte wurden vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat gefördert.

