

Reduktion von CO-Emissionen bei der Stückholzverbrennung im Naturzugbetrieb

Vorstellung eines neuen Berechnungsmodells für Stückholzfeuerungen

Dipl.-Ing. (FH) **O. Cramer**, LEDA-Werk GmbH & Co. KG, Leer;
Ing. (FH) **T. Lüken**, LEDA-Werk GmbH & Co. KG, Leer

Kurzfassung

Chargenweise betriebene Einzelraumheizer für Stückholz unterliegen immer schärferen Emissionsgrenzwerten, gleichzeitig steigen die Forderungen an diese Geräte in Bezug auf den Wirkungsgrad durch europaweite Energieeffizienzeinstufungen. Über den zeitlichen Verlauf der Abbrandbedingungen im Naturzugbetrieb existieren keine hinreichenden Kenntnisse. Speziell die Frage nach den erreichbaren CO-Emissionen, welche bei Stückholzfeuerungen im Wesentlichen für die Beurteilung der Ausbrandqualität herangezogen werden, kann über die gängige Literatur nicht beantwortet werden. Auch Strömungssimulationen können nur bedingt zur Problemlösung beitragen, da diese sich in der Regel auf einzelne Lastpunkte beschränken und den Brennstoff nicht zufriedenstellend darstellen können.

Ein neues Berechnungsmodell kann zur Optimierung beitragen und gibt Aufschluss über das erreichbare Emissionsminimum ohne den Einsatz von Sekundärmaßnahmen und ermöglicht bei deren Verwendung die Bewertung der Emissionsminderung. Die im Allgemeinen verwendete Berechnung, bei der „Holz“ ohne weitere Teilerlegung als homogener Brennstoff angenommen wird, lässt keine weitere Optimierung mehr zu.

Durch Zerlegung der Holzmasse in seine Unterbestandteile bzw. deren zeitabhängige Massenabnahme und ständigen Abgleich der Berechnung mit Prüfstandsversuchen und Strömungssimulation konnte ein Rechenmodell erstellt werden, welches erstmalig Rückschlüsse auf Leistung, Verweildauer und Temperatur über den gesamten Abbrand zulässt und zudem die minimal zu erwartenden CO-Emissionen im Vorfeld berechnet.

Reduction of CO-emissions during wood combustion in natural draft operation

Presentation of a new calculation model for logs

Abstract

Batch load operated appliances for wood log burning are always subject to more restrictive emission limits, the demands on these appliances to the efficiency by European efficiency classifications increase simultaneously. There is not enough knowledge about the temporal course of wood log burning in natural draft. Especially the question about the attainable CO-emissions which are used to rate the burning quality of wood log burning cannot be answered about the current literature. Flow simulations can also contribute only conditionally to the problem because they are reduced on nominal heat output and can't show the fuel satisfactorily.

A new calculation model can contribute to the optimization and gives information about the attainable Emission minimum without secondary measures and allows the assessment of the issues decreased by their use. The calculation generally used at which "wood" is accepted without a further partial taking apart than homogeneous fuel doesn't allow any further optimization.

By decomposition of the wood mass in its sub-components and their time-dependent mass removal with permanent comparison of the calculation with burning tests and flow simulation a computational model could be made which allows interferences on performance, residence time and temperature about the wood log burning process and moreover calculates this one at least to expecting CO-emissions in the front-end.

1. Stand der Technik

Allgemein erfolgt die Feuerraumauslegung über die Brennstoffanalyse und Luftbedarfsbestimmung vom Brennstoff „Holz“; nach der Analyse der Brennstoffzusammensetzung wird der Heizwert berechnet, hieraus ergibt sich eine Gesamtwärmeleistung. Alle weiteren berechneten Kenngrößen beziehen sich auf die Mittelwerte von Leistung und Sauerstoffbedarf.

Der nötige Luftüberschuss wird aus Diagrammen nach Feuerungstyp abgeschätzt; wie hoch der Luftüberschuss für bspw. eine Stückholzfeuerung tatsächlich sein muss, wird nicht genauer betrachtet; Luft- und Abgasquerschnitte sowie die Ausführung, Größe und Dämmung der Heizkammer werden in der Regel durch Erfahrungswerte bestimmt, als Resultat erhält man einen Abbrandverlauf, welcher optimalerweise die geforderten Grenzwerte einhält.

Andernfalls wird durch Änderung von Querschnitten oder Holzmenge versucht, sich der Einhaltung der Grenzwerte anzunähern. Unterstützt wird diese Auslegung teilweise noch durch Strömungssimulationen, welche im Normalfall ebenfalls auf die mittlere Leistung bezogen werden.

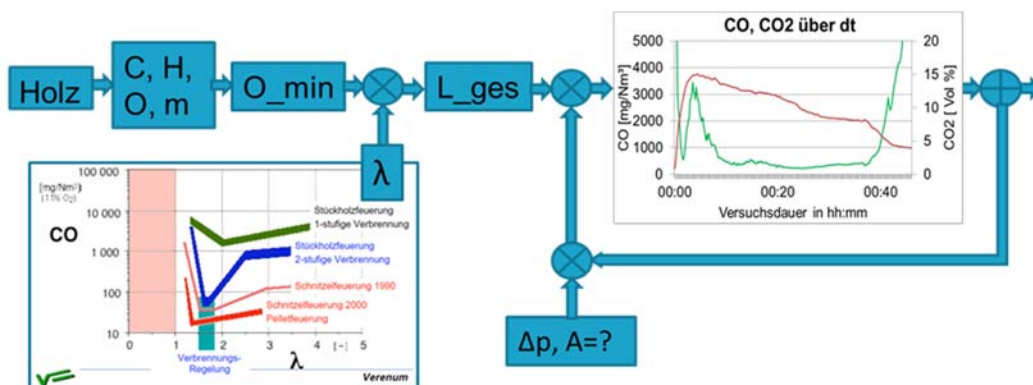


Abbildung 1: Auslegung einer Stückholzfeuerung, CO-Lambda-Diagramm nach [1]

Welche Luftmenge tatsächlich wo und wann benötigt wird, ist in keinem bekannten Werk angegeben. Auch das erreichbare CO-Minimum kann nicht konkretisiert werden. Die aktuelle Feuerraumauslegung stößt an ihre Grenze, aktuelle Untersuchungen und Forschungsberichte bestätigen diese Tendenz.

2. Neuer Berechnungsansatz

Im Jahr 2010 begannen wir mit dem Aufbau einer neuen Feuerraumdimensionierung, welche die bekannten Parameter zu jedem Abbrandzeitpunkt neu berechnen sollte. Ziel war eine Berechnungsgrundlage für Feuerräume mit definierten Querschnitten und ein besseres Verständnis für die ausschlaggebenden Beeinflussungsmöglichkeiten. Da die Volumenströme (fast ausschließlich) von der Temperatur und dem Unterdruck abhängen, sollte für alle Bereiche des Feuerraums eine Bestimmung von Temperatur und Druck zu jedem Zeitpunkt möglich sein.

Die Brennkammertemperatur T_B wird abgeschätzt und mit der Eingabe der vorgegebenen Scheitparameter Volumen, Oberfläche (zu V_A) und Restfeuchte U die Verflüchtigungsdauer t_f der Gasphase nach M. Hellwig bestimmt:

$$t_f = 1,846 \times \left(\frac{V_A}{18}\right)^{1,89} \times \left(\frac{T_B}{1000}\right)^{-1,74} \times \left(\frac{1 + U/100}{1,15}\right)^{3,26}$$

Formel 1: Berechnung der Verflüchtigungsdauer [2]

Zur Ermittlung der benötigten Verbrennungsluftmenge wurde die Gewichtsabnahme verschiedener Feuerungstypen verglichen und über deren Verlauf ein Polynom gebildet, anschließend kann die prozentuale Massenabnahme auf die Verflüchtigungsdauer umgerechnet werden. Die anteilige Massenabnahme im Glutbett wird über gesonderte Auswertungen des Ausbrandes der entsprechenden Feuerungen und die Bildung eines weiteren Polynoms berechnet:

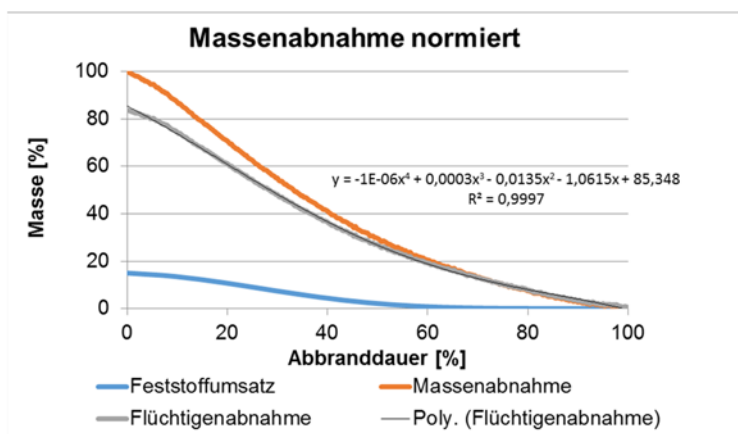


Abbildung 2: Polynom der Flüchtigenabnahme

Die benötigte Luftmenge sollte nicht mehr auf „Holz“ sondern auf die Einzelbestandteile bezogen werden. Diversen Quellen wurden daher die Einzelbestandteile von Buchenholz entnommen.

Tabelle 1: Zerlegung von Buchenholz in Einzelbestandteile [3-6]

Komponente	Ma-%	Bestandteil	Ma-%	Ges.-%	Untergruppe	C	H	O			
Cellulose	44			44		6	10	5			
Hemicellulose	34	Hexosen	83	28,22	Galactose	6	12	6			
					Glucose	6	12	6			
					Mannose	6	12	6			
					Pentosen	17	5,78	Arabinose	5	10	5
								Xylose	5	10	5
Lignin		p-Cumarylalkohol	4	0,8		9	10	2			
		Coniferylalkohol	53	10,6		10	12	3			
		Sinepylalkohol	43	8,6		11	14	4			

Als Ergebnis lassen sich benötigter Sauerstoffbedarf und resultierende Standardbildungsenthalpie bei vollständiger Reaktion berechnen. Für die weitere Berechnung wurde der zeitabhängige Temperaturverlauf in Buchenholz mit der thermischen Zersetzung von Holz kombiniert.

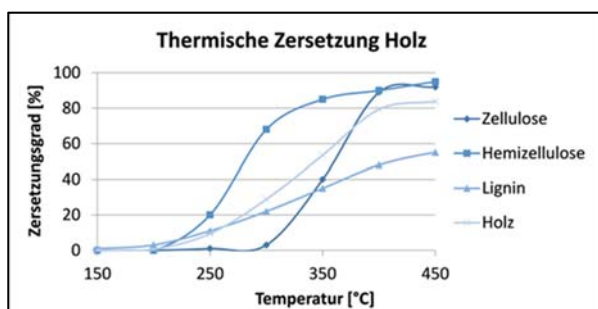


Abbildung 4: Thermische Zersetzung von Holz und Untergruppen [7]

Ausgehend von den unterschiedlichen Siedepunkten der Einzelbestandteile und davon, dass die Holzkohle im Wesentlichen aus Lignin besteht, wurde über eine Matrix der prozentuale Abbau der Einzelbestandteile mathematisch beschrieben.

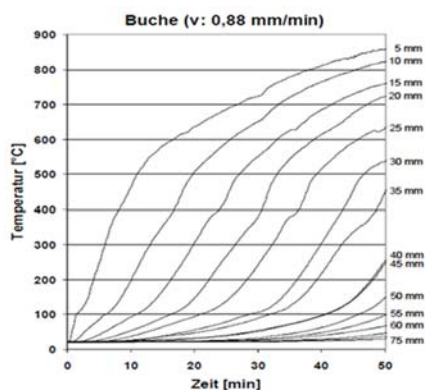


Abbildung 5: Temperaturprofil von Buchenholz [8]

Da die Holzoberfläche die freigesetzte Gasmenge limitiert, wurde entsprechend der Aufheizung der Scheite die Abnahme der Einzelbestandteile angepasst. Deren Verhältnis ändert sich während des Abbrands entsprechend der thermischen Zersetzungsgrade und der Wärmeeindringung. Über den zuvor bestimmten Anteil der Holzkohle ist nun die Aufteilung in benötigte Primär- und Sekundärluftmenge möglich und auch der CO₂-Wert kann unter Annahme eines konstanten Zuluftvolumenstroms berechnet werden. Für eine grobe Übersicht wurde der Abbrand zunächst in 1/12-Intervalle der Abbranddauer zerlegt, erst nach dem Abgleich auf dem Prüfstand sollten die Intervalle verkürzt werden.

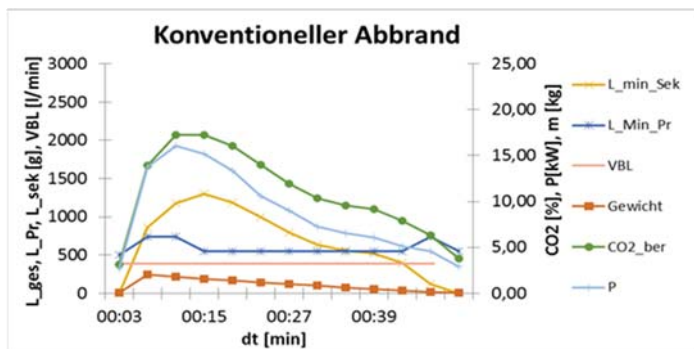


Abbildung 6: Luftbedarf und Leistung des Ersatzmodells

3. Parallele Berechnung und Messung

Die werkseigene Prüfzelle wurde zur Verifizierung der Ergebnisse um Differenzdruckmessgeräte, verschiedene Temperaturfühler und ein Dichtheitsmessgerät ergänzt, in der Entwicklung wurde die seit 2008 eingesetzte Strömungssimulation (FloEFD Pro, Mentor Graphics) durch eine Verbrennungsrechnung erweitert.

Zur Gestaltung von Brennkammer und Nachbrennkammer gab es verschiedene Untersuchungen. Ein Gemeinschaftsprojekt zur Nachbrennkammeroptimierung fand mit der Hochschule Emden-Leer und Fa. FlowMotion 2013/2014 statt, hier sollte der Einfluss der Ein- und Auslassquerschnitte bzw. der Heizgasführung auf die Emissionen festgestellt werden. Bei diversen parallel zur Berechnung laufenden Abbrandversuchen wurden die Druckdifferenzen zwischen Aufstellraum, Luftsystem, Brennkammer, Nachbrennkammer und Schornstein bei unterschiedlichen Leistungen erfasst. Über Temperatur und Massenstrom wurde der Leistungsanteil am Brennkammerausgang bestimmt.

Um die während der Versuche festgestellten Druckschwankungen, welche durch Stau- und Auftriebsdruck hervorgerufen werden, berechnen zu können, wurde es nötig, die Wärmeabgabe über die Feuerraumwände zu bestimmen. 2014 wurden gemeinsam mit Dr.-Ing. Gerhard Kok (Prof. für Thermodynamik und Strömungslehre an der FH Emden-Leer) zusätzliche Temperaturmessungen im Feuerraum durchgeführt, um die tatsächliche

Temperaturverteilung besser abschätzen zu können und den Strahlungswärmeanteil zu bestimmen.

Für unsere Auslegungshilfe wurden die U-Werte und Emissionsgrade verschiedener Materialkombinationen in Abhängigkeit der Wand- und Feuerraumtemperatur einbezogen, entsprechende Wärmeübergänge wurden bestimmt. Für Flammenvolumen und –Oberfläche wurde für die Berechnung der Strahlungswärme in Abhängigkeit von Leistung und LambdaWert ein Ersatzmodell gebildet. Für die Wärmeabgabe musste die Brennkammer nun in mehrere Teile zerlegt und die Wärmeabgabe stufenweise über den 1. Hauptsatz der Thermodynamik für offene Systeme berechnet werden.

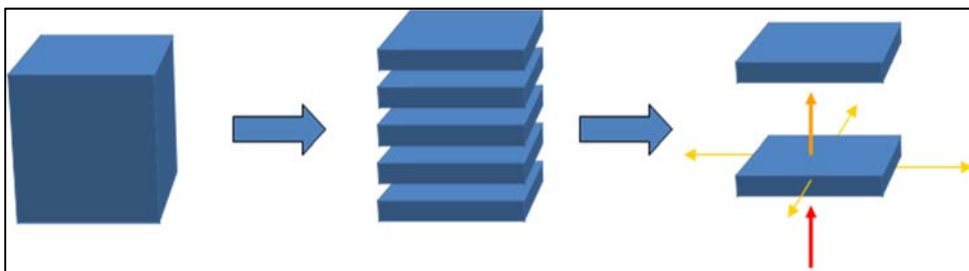


Abbildung 7: Prinzip der Brennkammerzerlegung zur Bestimmung der Wärmeabgabe

Für jeden Teilschnitt wurde über die eingehende Wärmemenge und den Strahlungsanteil die Wandtemperatur zunächst abgeschätzt. Die Energie, die über die Brennkammer durch Strahlung, Konvektion und Wärmedurchgang abgebaut wurde, wird von der vorherig eingegangenen Wärmemenge abgezogen und dient als Eingangsgröße für den nächsten Abschnitt. Als Ergebnis lässt sich der Auftriebs- und Staudruck am Brennkammerausgang bestimmen.

Der resultierende Differenzdruck macht die genauere Berechnung des Zuluftvolumenstroms möglich; unter Einbeziehung der Dichte- und Viskositätsänderung der Heizgase bzw. der Verbrennungsluft und unter Berücksichtigung der Einzelwiderstände des Luftsystems kann nun der entstehende CO₂-Verlauf berechnet werden. Das Luftsystem wurde hierzu mit definierten Querschnitten versehen, deren Verhältnis zum Versorgungsquerschnitt die druckabhängige Luftmenge berechenbar macht. Der Rest des Luftsystems wurde so weit überdimensioniert, dass der Druckverlust auch bei Maximalleistung unter 5% beträgt. Für das Luftsystem inklusive der Vorwärmung von Primär- und Sekundärluft mit entsprechenden Dichte- und Viskositätsänderungen können die Querschnitte zum Erreichen der gewünschten Luftmenge nun relativ genau berechnet werden.

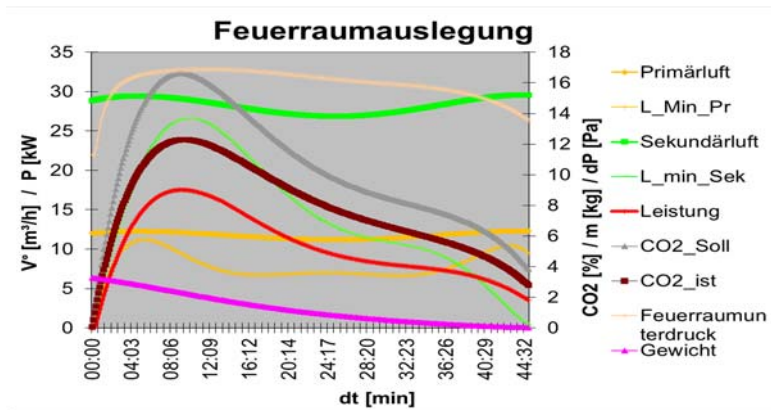


Abbildung 8: Brennkammerberechnung

Die Berechnung wurde außerdem weiter konkretisiert und nach übereinstimmenden Referenzversuchen auf ein 10s- Intervall verringert, um die Leistung und den Luftbedarf noch genauer bestimmen zu können. Der vorgegebene CO₂-Verlauf (CO₂_Ist) kann mit dem zu erwartenden (CO₂_soll) verglichen werden, die Querschnitte sind bis zur bestmöglichen Übereinstimmung von gewünschtem zu berechnetem Verlauf anzupassen.

Anhand der Berechnung der mittleren Brennkammertemperatur in unterschiedlichen Ebenen lässt sich anschließend das Mittel über den gesamten Abbrand berechnen. Dieses muss mit der zu Beginn abgeschätzten Temperatur übereinstimmen, ansonsten ist die vorherige Schätzung anzupassen oder die Vorgabe des CO₂-wertes zu ändern.

4. Optimierung

Nach guter Übereinstimmung von Prüfstand und Berechnung wurden zur weiteren Optimierung Parameterstudien bei unterschiedlichen Feuerräumgrößen durchgeführt, bei denen die Übergabe- und Auslassquerschnitte für unterschiedliche Luftmengen und Geschwindigkeiten primär- und sekundärseitig bis zum Erreichen der jeweiligen CO-Minima bei verschiedenen Leistungen angepasst wurden.

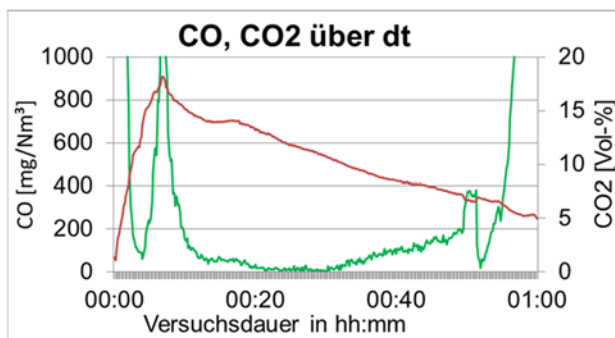


Abbildung 9: Optimierter Emissionsverlauf

Während der Optimierung konnten wir erstmalig eine Brennkammer kurzzeitig ohne CO-Emissionen betreiben; durch die nun bekannte Leistung und Temperatur zum entsprechenden Zeitpunkt und die weiteren Abbrandversuche der anderen Feuerräume und deren Abweichung vom Optimum konnte ein funktionaler Zusammenhang zwischen (relativer) Brennkammergröße, Luftüberschuss und resultierender CO-Emission hergeleitet werden, welcher das erreichbare Emissionsminimum in der Hauptabbrandphase ($1,5 \leq \lambda \leq 4,5$) konkretisiert.

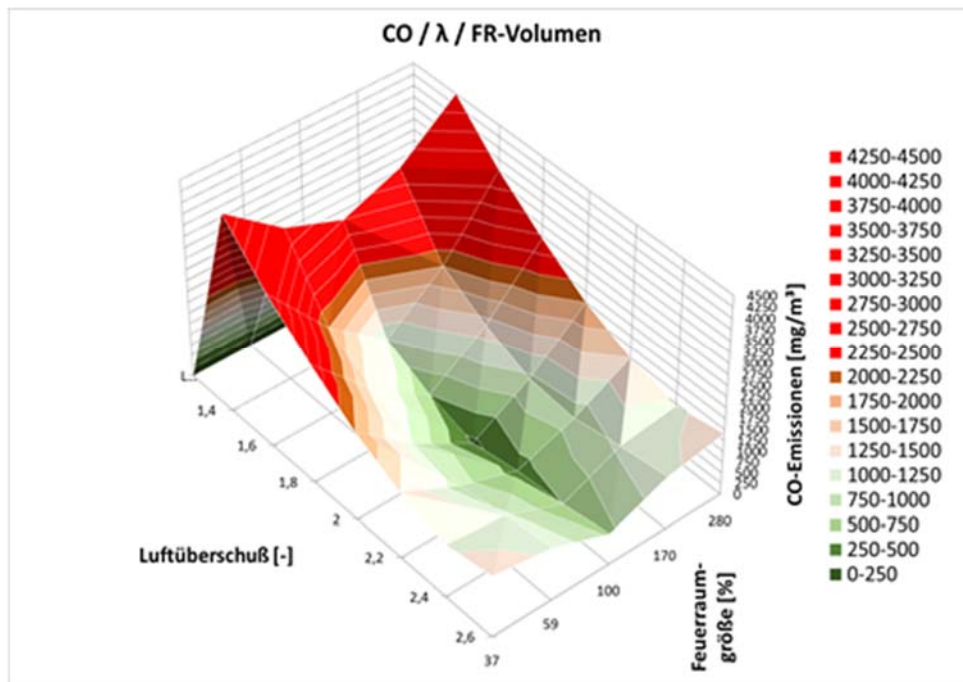


Abbildung 10: 3D-Diagramm CO-Emission

5. Emissionsgrenzwerte und Praxistauglichkeit

Die neue Art der Berechnung zeigt die Grenzen der technischen Machbarkeit, denn die (Minimal-) Emissionen hängen auch von der Restfeuchte des eingesetzten Brennstoffs ab. Durch steigenden Wassergehalt wird der benötigte Primärluftanteil erhöht, damit ein Großteil der Restfeuchte hinreichend schnell verdampft und die Emissionen entsprechend der Normprüfung [9] auf ein geringes Niveau kommen. Gleichzeitig steigt aber die maximale Leistung, der CO₂-Peak muss über einen größeren Sekundärluftüberschuss abgedeckt werden und der Lambda-Wert wird insgesamt erhöht.

Liegt der nötige Luftüberschuss für minimale CO-Emission bei ofengetrocknetem (Prüf-) Holz mit 12-13% Restfeuchte noch bei $\lambda=2$, steigt er bei Verwendung von Holz mit Restfeuchte bis 20% (wie bei 2-jähriger Lagerung im Freien zu erwarten) auf $\lambda=2,5$. Bei geeigneter

Brennkammergröße kann der Luftbedarf unter Einhaltung der derzeitigen Grenzwerte zwar weiter verringert werden, die CO-Emissionen sind dann aber nicht mehr optimal.

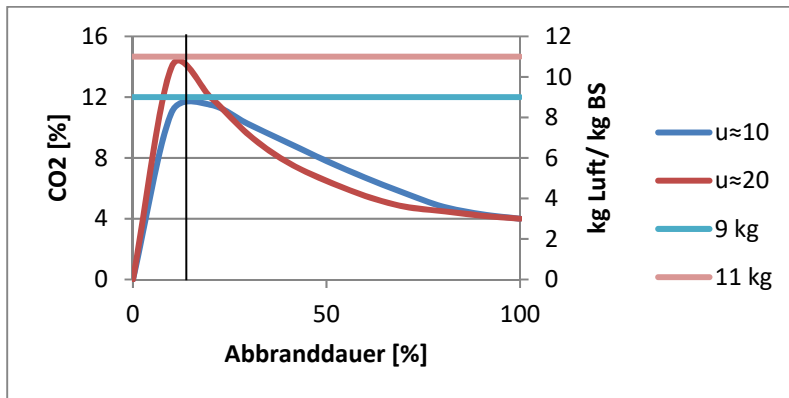


Abbildung 11: Luftbedarf in Abhängigkeit der Restfeuchte

Es sollte daher für Seriengeräte ein Mittelwert von 8% CO₂ angestrebt werden, andernfalls wird während des Leistungsmaximums die große Heizgasmenge nicht mehr ausreichend mit Verbrennungsluft versorgt und die Emissionen werden deutlich erhöht. Außerdem kommt es durch Sekundärluftunterdeckung bereits bei geringfügig höherer Leistung zu einem deutlichen Anstieg der CO-Emissionen.

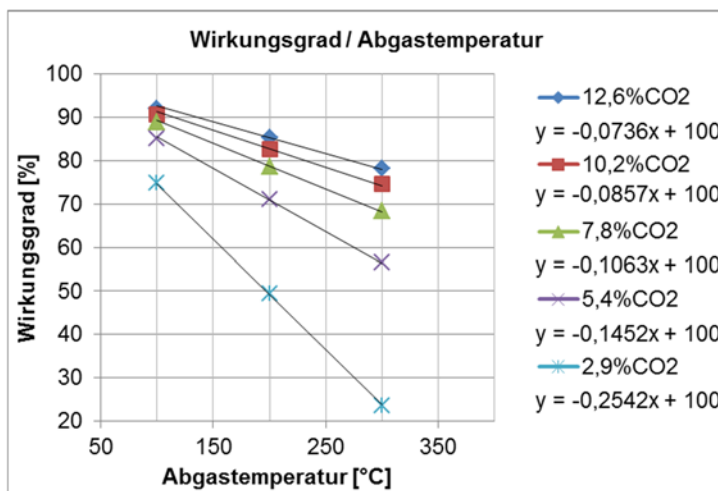


Abbildung 12: Wirkungsgrad über Temperatur

Auch der Wirkungsgrad lässt sich nicht beliebig steigern, wenn das System im Naturzug funktionieren soll. Für den sicheren Betrieb wird nach TROL [10] eine Schornsteineintrittstemperatur von 170°C benötigt, bei entsprechend konstruierten Feuerungen mit 8% CO₂ beträgt der erreichbare thermische Wirkungsgrad bestenfalls ≈82%. Dieser Wert ergibt sich über die Abhängigkeit des Wirkungsgrads von Temperatur und CO₂-Wert.

Der Multiplikator x für die Temperaturdifferenz ändert sich mit dem CO_2 -Wert z wie folgt:

$$x = 0,6173 \times z^{-0,848}$$

Formel 2: Multiplikator für Temperaturdifferenz

Der Wirkungsgrad lässt sich nun durch CO_2 und Temperaturdifferenz berechnen:

$$\eta = -\left(0,6173 * \text{CO}_2^{-0,848}\right) * \Delta T + 100$$

Formel 3: Wirkungsgradbestimmung

Umgerechnet erhält man den CO_2 -Wert:

$$\text{CO}_2 = \left(\frac{\left(\frac{100 - \eta}{\Delta T}\right)}{0,6173}\right)^{-1,18}$$

Formel 4: Berechnung CO_2

6. Zusammenfassung

Die Erstellung der Berechnungsgrundlage für Stückholzfeuerungen wurde mit Hilfe von über 500 Abbrandversuchen validiert, teilweise führten Vereinfachungen im Rechenweg zu hinreichender Genauigkeit, andere funktionale Zusammenhänge erforderten einen hohen Rechen- oder Prüfaufwand; alleine zur Feststellung der optimalen Anströmgeschwindigkeit wurden über 300 Abbrandversuche durchgeführt.

Noch immer werden viele Geräte nach dem Trial-and-Error-Prinzip gebaut, die technischen Grenzen sind über die bekannten Berechnungsverfahren erreicht. Über das neue Berechnungsmodell können im Vorfeld realistische Aussagen über das Emissionsverhalten gemacht werden, eventuell erforderliche Sekundärmaßnahmen können bereits in der Entwicklungsphase einbezogen werden.

Weitere Ansätze zur Berechnung sind bereits in Bearbeitung und können die Feuerraumauslegung für die Zukunft noch weiter verbessern. Viel wichtiger ist jedoch der erreichte Wissensstand über die ausschlaggebenden Parameter sowie über das erreichbare CO -Minimum bei Stückholzfeuerungen optimaler Größe, welcher die Abschätzbarkeit vom erreichbaren Minimum für gängige Feuerraumgrößen und -Leistungen endlich konkretisiert. In der Normprüfung sollte zukünftig mehr Wert auf realistische Holzfeuchte gelegt werden um die Emissionen im späteren Betrieb tatsächlich zu reduzieren.

- [1] Nussbaumer, T. (2003): Skript Energietechnik und Umwelt, ETH Zürich, S.153-155
- [2] Hellwig, M.: (1988) Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe, TU München, S.87
- [3] Mombächer, R. (1988): Holzlexikon, DRW-Verlag
- [4] Pöhler-Rotach, Seubert-Hunziker (2002): Holzchemie, ETH Zürich, S. 7
- [5] Niemz, P. (2006): Holzphysik, ETH Zürich, S. II-10
- [6] Launhardt, T. (2002): Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen, TU München, S. 4
- [7] Hellwig, M.: (1988) Zum Abbrand von Holzbrennstoffen unter besonderer Berücksichtigung der zeitlichen Abläufe, TU München, S.15
- [8] Lings, A. (2003): Untersuchung des Abbrandes und der Brandgase ausgewählter Holzarten in Abhängigkeit vom chemischen und strukturellen Holzaufbau, TU München, S.73, Abb "d)"
- [9] Bundesgesetzblatt (01/2010): 1. BImSchV, Anlage 2.2.1
- [10] ZVSHK (2010): Technische Regeln für den Ofen- und Luftheizungsbau