

Lange Abbranddauer, niedrige Emissionen und kleine Heizleistung

Innovativer Holzofen für Minergie

Dank Verbesserung der Gebäude sinkt der Wärmebedarf bei gleichzeitig steigenden Komfortansprüchen. Zusatzheizungen mit Holz sind eine ideale Ergänzung zu Wärmepumpen und Solaranlagen. Im Beitrag wird ein neues Konzept eines Holzofens vorgestellt, das mit einer einzigen Holzaufgabe eine lange Heizdauer bei geringer Wärmeabgabe erzielt. Die Entwicklung wird von der Kommission für Innovation und Technologie (KTI) unterstützt und mit der Firma Tiba AG durchgeführt.

Thomas Nussbaumer, Peter Odermatt*

Das Prinzip basiert auf einer durch Nachrutschen beschickten Verbrennungsröhre und einer Nachbrennkammer mit Sekundärluft. Dank der zweistufigen Verbrennung werden niedrige Schadstoffemissionen erzielt und die Art der Bedienung vorgegeben. Die geringe Grundfläche und die kleine Wärmekapazität der Primärzone ermöglichen eine Abbranddauer von über 5 Stunden bei einer Heizleistung von rund 7,4 kW. Über den ganzen Abbrand ab Anzünden werden CO-Emissionen von rund 500 mg/m³ und Staubemissionen von rund 15 mg/m³ bei 13 Vol.-% O₂ erzielt. Das Prinzip ist für Naturzug mit Stückholz von 25 cm Länge geeignet. Durch Vorgabe des Anzündvorgangs werden Fehlbedienungen eingeschränkt. Zudem ist zum Betrieb des Ofens kein Eingriff nach Schliessen der Anzündtüre notwendig.

1. Einsatzgebiet

In der Schweiz trägt die Holzenergie zu rund 4 Prozent zum Endenergieverbrauch bei. Nach einem starken Zu-

wachs in den letzten 20 Jahren ist nun noch eine Erhöhung um rund 50 % möglich [1]. Weil das Potenzial begrenzt ist, gilt es, Holz mit maximaler Effizienz einzusetzen. Das speicherbare Energieholz ist dabei eine ideale Ergänzung zu saisonal anfallender Solarenergie und zu mit Wärmepumpen genutzter Umweltwärme. Für Luft-Wasser-Wärmepumpen gilt, dass die Effizienz bei abnehmender Umgebungstemperatur sinkt, während gleichzeitig der Wärmebedarf steigt. Wird die Wärmepumpe mit einer Holz-Zusatzheizung ergänzt, kann sie kleiner dimensioniert werden und erreicht zudem eine höhere Jahresarbeitszahl. Für Minergie-Häuser besteht somit ein Bedarf nach hochwertigen Holzheizungen mit Leistungen von deutlich unter 10 kW. Solche neuen Anwendungen stellen hohe Anforderungen an den Komfort moderner Holzheizungen bei immer strengeren Emissionsvorschriften.

Untersuchungen zeigen allerdings, dass der Kaltstart sowie eine nicht

Parameter	Startphase	Stationäre Phase	Ganzer Abbrand
Füllmenge			10 kg
Abbranddauer Δt_A (t_0 bis Abbruch)			5,4 h
Feuerungsleistung während Δt_A			7,4 kW
Abgastemperatur			<180 °C
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad			>85 %
Dauer Startphase			15 min
Luftüberschuss	2.10	1.70	2.12
Staub in mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	50	13	
CO in mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂	675	20	525
VOC in mg/m ³ bei 13 Vol.-% O ₂			18

Tabelle 1: Kennwerte und Emissionen des Holzofens.

ideale Betriebsweise die Schadstoffemissionen deutlich erhöhen [2-4]. Zur Beurteilung der Umweltbelastung sind deshalb eine in der Praxis übliche Bedienung und eine Bewertung über einen ganzen Abbrand erforderlich [5]. In Bezug auf die Luftreinhaltung sind dabei vor allem die Emissionen an Russ und organischen Verbindungen entscheidend [6-7]. Zur Vermeidung hoher Emissionen ist zudem eine kurze Anzündphase wichtig [8]. Während des Starts und der stationären Phase dient der Gehalt an Kohlenmonoxid (CO) im Abgas als Leitgrösse für die Verbrennungsqualität, da bei tiefem CO in der Regel auch die organischen Emissionen niedrig sind [9]. Zudem ist es von Vorteil, wenn die Bedienung vorgegeben und der Betreibereinfluss eingeschränkt wird. Um einen hohen Komfort bei niedrigen Emissionen zu erzielen, sind lange Abbrandphasen bei kleiner Leistung notwendig. Zudem sollte die Verbrennung ohne manuelle Eingriffe auskommen. Konventionelle Holzöfen mit einstufigem oberem Abbrand er-



Bild 1: Prototyp im Forschungslabor der Hochschule Luzern – Technik & Architektur.

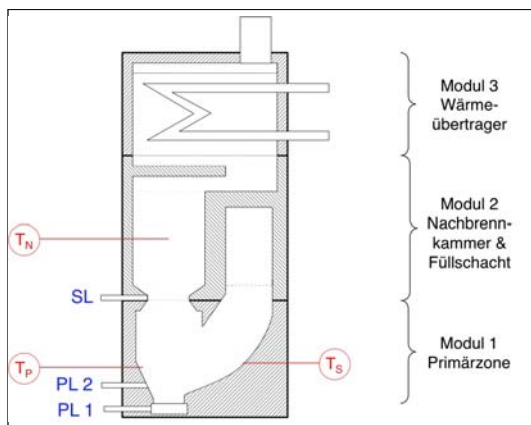


Bild 2: Schema des Holzofens mit Verbrennungsretorte und zweistufiger Verbrennung.

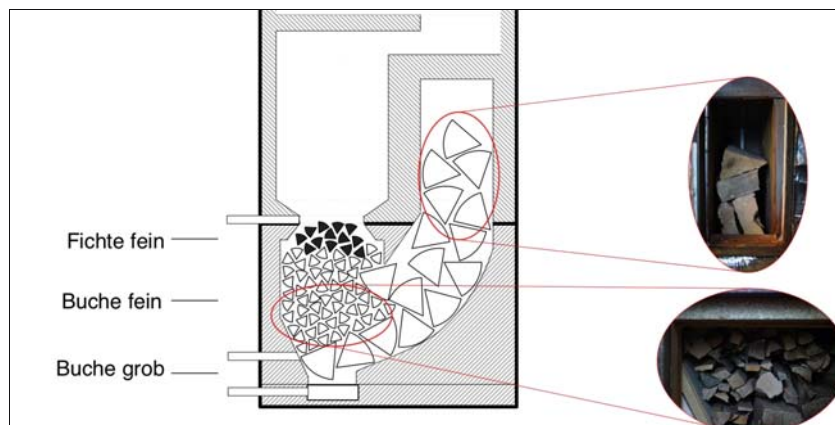


Bild 3: Befüllung des Holzofens.

füllen diese Anforderungen nicht oder nur bedingt [2].

2. Ziel

Ziel der Arbeit ist ein neuartiges Verbrennungskonzept für Holzöfen, das eine Abbranddauer von mindestens 4 Stunden mit einer einmaligen Holzaufgabe von 6 bis 12kg ermöglicht und eine emissionsarme Verbrennung erzielt. Durch einen kontinuierlichen Abbrand sollen die Emissionen an Kohlen-

monoxid, organischen Verbindungen und Staub verringert und die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung [10] um mindestens 50 % unterschritten werden. Die Zielwerte betragen somit $CO < 750 \text{ mg/m}^3$, $VOC < 100 \text{ mg/m}^3$ und $\text{Staub} < 37,5 \text{ mg/m}^3$ bei 13 Vol.-% O_2 . Diese Werte sollen nicht nur während des stationären Betriebs, sondern als Mittelwert ab dem Anzünden der Feuerung mit Start- und Ausbrandphase eingehalten werden. Diese Bewer-

tung ist strenger als gemäss Typenprüfung. Zudem soll die Feuerung für Naturzug geeignet sein und der Betrieb soll eine fehlerhafte Bedienung einschränken.

3. Aufbau des Holzofens

Die Feuerung weist eine Aufteilung der Verbrennung in eine Primär- und Sekundärzone auf, wodurch die Wärme-freisetzung aus der Feststoffumwandlung und der Gasausbrand in der

Vermietung mobiler Heiz- und Warmwasserzentralen bei

- Heizungssanierungen
 - Wärmeversorgungsschwierigkeiten
 - Bauaustrocknungen
- 3 kW – 2500 kW



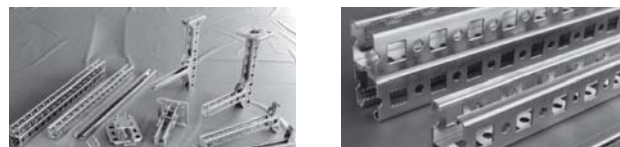
Ihr Partner zu jeder Jahreszeit

WÄRMEBAU VERTRIEBS AG

Vermietung mobiler Heiz- und Warmwasserzentralen

Vor Ort 23, 8104 Weiningen
 Tel. +41 (0)44 750 66 50
 Fax. +41 (0)44 750 17 10
 www.wbvag.ch

BE +41 (0)31 331 18 44
 BL +41 (0)61 272 01 91
 LU +41 (0)41 240 22 25



Montagematerial und Profilschienen
Stahl verzinkt und rostfrei A4 WN 1.4571

Für alle Montagearbeiten und Befestigungen. Für Regale, Rahmen, Böcke, Bühnen, Solarpaneele, Prüfvorrichtungen, Lager-/Werkstatteinrichtungen etc.

- Gelochte L-, U-, C-, Teleskop- und verzahnte MULTIFIX-Profilschienen für leichte, mittlere und schwere Belastungen. Verzahnte Ankerschienen. Zuschnittservice.
- Konsolen, Ausleger, Stützen, Befestigungen für den Stahlbau, Weitspann-Tragprofile incl. Verbinder etc.
- Leichte, mittlere und schwere Deckenraster-Systeme

Sparen Sie Zeit! Senken Sie Kosten! Verwenden Sie LANZ Montagematerial und Profilschienen. Wir beraten Sie und senden Muster und Unterlagen. Rufen Sie an: **lanz oensingen ag CH-4702 Oensingen Tel. 062 388 21 21**

Mich interessiert MULTIFIX-Montagematerial. Bitte senden Sie Unterlagen.

Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name / Adresse / Tel. _____

•MU2

lanz oensingen ag
 CH-4702 Oensingen Südringstrasse 2
 Telefon 062 388 21 21 Fax 062 388 24 24
 www.lanz-oens.com info@lanz-oens.com

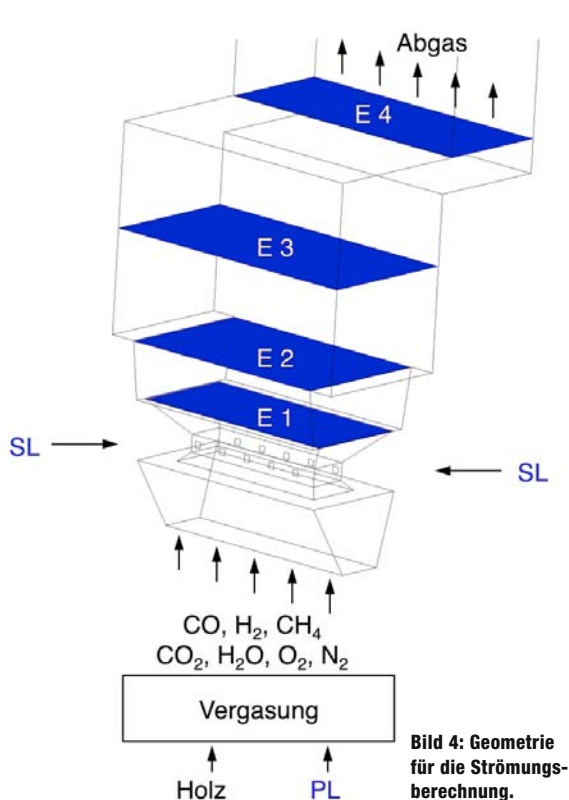


Bild 4: Geometrie für die Strömungsberechnung.

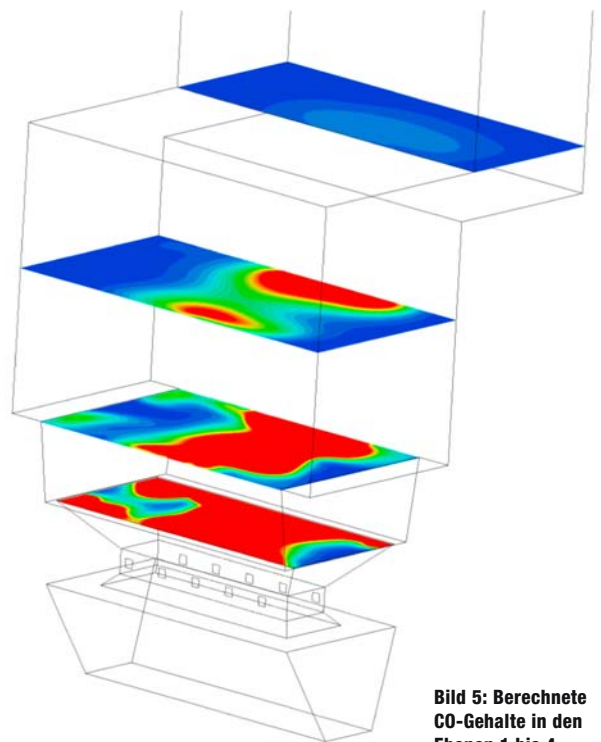
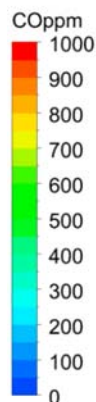


Bild 5: Berechnete CO-Gehalte in den Ebenen 1 bis 4.

Flamme entkoppelt werden (Bild 1, Bild 2). Durch den modularen Aufbau können die einzelnen Elemente unabhängig verändert werden. Für die Versuche kommt eine Wasserkühlung zum Einsatz, mit der für die Probenahme geeignete Temperaturen von 160°C bis 180°C sichergestellt werden. Da der Brennstoff und die Anzündmethode einen grossen Einfluss auf die Startphase haben [2, 4, 8], werden die Befüllung und der Anzündvorgang, wie in Bild 3 gezeigt, vorgegeben. Zuerst werden einige Buchenholzscheiter in den Füllschacht eingelegt, danach in der Retorte fein gespaltenes Holz eingebracht und der Füllschacht ganz gefüllt. Zum Anzünden dienen zwei wachsgetränkte Holzwollestücke, die auf das Anzündholz gelegt werden und zu einem Anzünden von oben führen [8]. Sobald die Anzündhilfen sicher brennen, wird die Tür geschlossen. Eine Befüllung umfasst 10 bis 12 kg trockenes Holz unterteilt in rund 200 g feine Fichte, 1,8 kg feine Buche sowie 8 kg bis 10 kg Buchen-Scheiter zu je 500 g bis 900 g.

4. Numerische Strömungsoptimierung mit CFD

Die Ausbrandqualität wird durch die Mischung zwischen Sekundärluft und brennbaren Gasen und durch die Strömung in der Nachbrennkammer beeinflusst. Um eine günstige Lösung zu er-

zielen, wird die Sekundärlufteindüsung untersucht, wobei die Verbrennung als zweistufiger Prozess beschrieben wird [9, 11]. Die Vergasung wird nach Reed [12] mit einer Primärluftzahl von 0,4 angenommen. Damit werden die Strömung mit Computational Fluid Dynamics (CFD) berechnet und die Verbrennung mit dem Eddy Dissipations Model (EDM) modelliert [11]. Bild 4 zeigt die Geometrie. Für die Sekundärluft werden drei Fälle unterschieden, nämlich Rückseite, Vorderseite sowie beidseitig versetzt. Zudem werden Anordnung, Anzahl und Durchmesser der Düsen variiert. Die Strömung wird durch die Reynolds-Zahl und das Impulsverhältnis zwischen Düsen- und Grundströmung charakterisiert. Die Reynolds-Zahl ist das Verhältnis zwischen Trägheitskräften und viskosen Kräften und ein Mass für die Turbulenz:

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (1)$$

u = Geschwindigkeit [m/s]

L = Länge [m]

ν = kinematische Viskosität [m²/s]

Das Impulsverhältnis beschreibt das Verhältnis der Impulsstromdichte der Düsenströmung zu derjenigen der Grundströmung:

$$IV_{DG} = \frac{\rho_D \cdot U_D^2}{\rho_G \cdot U_G^2} \quad (2)$$

Index D = Düsenströmung

Index G = Grundströmung [m/s]

ρ = Dichte des Fluids [kg/m³]

Zum Vergleich dient das auf den Referenzfall normierte Impulsverhältnis:

$$IV_{norm} = \frac{IV_{DG}}{IV_{DG,ref}} \quad (3)$$

Die CFD-Berechnungen zeigen folgende Trends [13]:

- Ein hohes Impulsverhältnis ist vorteilhaft für die Mischung und die Ausbrandqualität. Gleichzeitig nimmt jedoch der Druckverlust zu. Bei der einseitigen Anströmung sind zudem Effekte durch die Asymmetrie zu beachten.
- Eine Verteilung der Düsen auf beide Seiten liefert auch bei grossem Gesamtquerschnitt und kleinem Druckverlust sehr gute Ausbrandwerte.

Aufgrund dieser Resultate wird die beidseitig versetzte Anordnung ausgeführt. Bild 5 zeigt die Modellierung des Verbrennungsfortschritts und bestätigt, dass eine gute Vermischung und niedrige CO-Gehalte erzielt werden. Strahlen unvermischter Abgase können damit vermieden werden [13].

5. Experimente

Für die Erfolgskontrolle werden folgende Messgrössen erfasst:

- O₂, CO₂, CO, VOC, CH₄, und NMVOC

- Luftüberschuss λ (aus O_2)
- Abgasvolumenstrom
- Zuluftvolumenströme
- Temperaturen
- Feuerungstechnischer Wirkungsgrad
- Gesamtstaub gravimetrisch nach VDI 2066 mit Probenahme auf Planfilter.

Für die Datenauswertung dient der Messbeginn t_0 unmittelbar nach dem Anfeuern und Schliessen der Türe. Als Abbruchkriterium dient die Erreichung des ersten der zwei folgenden Kriterien: $CO_2/CO < 10$ oder $O_2 > 17\text{Vol.}\%$. Für die Mittelwertbildung der Emissionen erfolgt eine Gewichtung anhand des Abgasvolumenstroms [5]. Vor den Versuchen wurde der Einfluss des Kaminzugs untersucht. Verglichen wurden ein realitätsnaher Betrieb mit in Funktion der Abgastemperatur ansteigendem Kaminzug [2] und der Betrieb bei konstantem Förderdruck von 12Pa nach EN 13240 [14]. Für eine hohe Reproduzierbarkeit erfolgt der Variantenvergleich bei konstantem Förderdruck.

6. Resultate

Es wurden drei Prototypen realisiert und die Leistung schrittweise reduziert [13]. Die ersten Prototypen bestätigen die Funktion, wiesen jedoch wegen einer hohen Wärmekapazität der Vergasungszone eine lange Startphase und danach eine zu hohe Leistung auf. Die

modifizierte Konstruktion verfügt über eine reduzierte Wärmekapazität und Grundfläche und erzielt nebst einer kurzen Startphase eine Leistung von deutlich unter 10kW. Wie Tabelle 1 zeigt, werden die Zielwerte bei einer Feuerungsleistung von 7,4kW und einer Abbranddauer von über 5 Stunden sicher eingehalten. Bereits während der Startphase betragen die CO -Emissionen unter $1000\text{mg}/\text{m}^3$ bei $13\text{Vol.}\% O_2$. Danach wird ein stationärer Abbrand mit CO unter $100\text{mg}/\text{m}^3$ erreicht (Bild 6). Über den ganzen Abbrand mit Startphase beträgt der CO -Gehalt rund $500\text{mg}/\text{m}^3$ und der Staub rund $15\text{mg}/\text{m}^3$. Dank einer mittels Temperaturmessung gesteuerten Luftklappe kann der Holzofen nach dem Anzünden ohne manuelle Eingriffe betrieben und Luftmangel vermieden werden.

7. Schlussfolgerungen

- Der zweistufige Holzofen mit einer durch Nachrutschen von Stückholz in eine Verbrennungsretorte betriebenen Vergasungszone und anschließender Nachbrennkammer ermöglicht eine lange Abbranddauer bei geringer Leistung und mit niedrigen Emissionen. Dank einer einfachen Verbrennungsregelung ist nach dem Schliessen der Anzündtüre kein manueller Eingriff mehr notwendig. Der neuartige Holzofen eignet sich damit zum

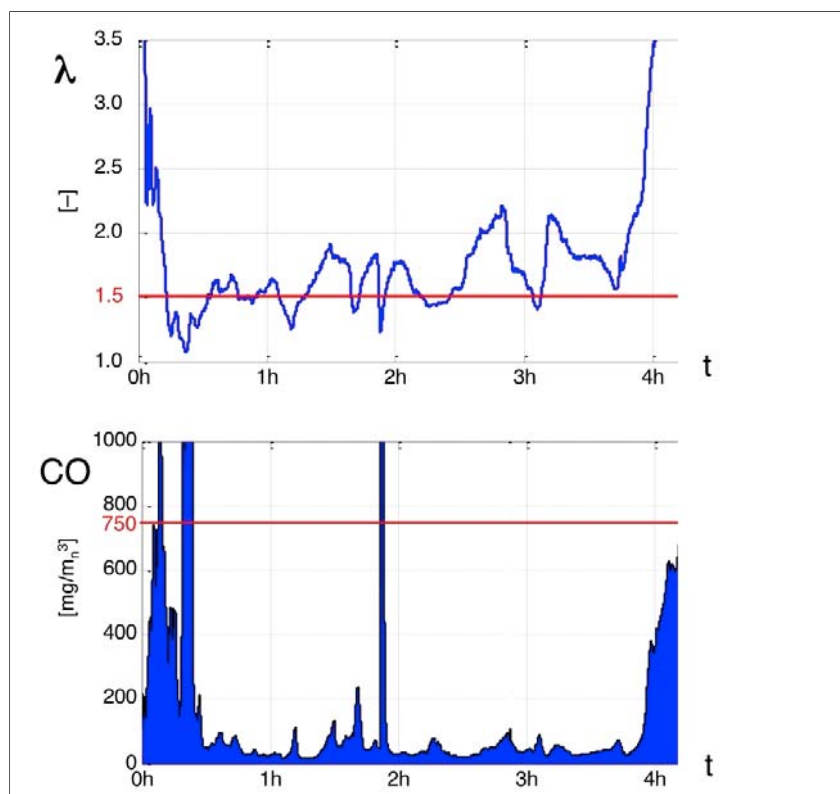


Bild 6: Luftüberschuss (oben) und CO -Gehalt (unten) in Funktion der Abbrandzeit.

Literatur

- [1] Manser, R., 11. Holzenergie-Symposium, 17.9.10, ETH Zürich, 23–35
- [2] Nussbaumer, T. et al., 16th Europ. Biomass Conf., 2–6 June 2008, Valencia
- [3] Good, J. et al., 11. Holzenergie-Symposium, 17.9.10, ETH Zürich, 145–172
- [4] Schön, C., Hartmann, H., 20th Europ. Biomass Conf., 18–22 June 2012, Milano
- [5] Nussbaumer, T., Wagner, D., Heizung Klima 4 1996, 157–161
- [6] Nussbaumer, T., Holz-Zentralblatt, 136. Jg., Autorenverzeichnis Nr. 44 (2010), 1110–1112
- [7] Johansson, L., Biomass and Bioenergy, Vol. 25, 2003, 435–446
- [8] Richtig Anfeuern, Holzenergie Schweiz, Zürich 2007
- [9] Nussbaumer, T., Energy & Fuels, Vol. 17, No 6, 2003, 1510–1521
- [10] Luftreinhalte-Verordnung, Stand am 15. Juli 2010, Artikel 814.318.142.1
- [11] Baillifard, M., Nussbaumer, T., 10. Holzenergie-Symposium, Zürich, 2008, 93–114
- [12] Reed, T., Biomass Gasification, Energy Technology Review. Vol. 67. 1981
- [13] Odermatt, P., Nussbaumer, T., 12. Holzenergie-Symposium, Zürich 14.9.12, 31–52
- [14] EN 13240: Raumheizer für feste Brennstoffe

Beispiel als komfortables Heizsystem in Kombination mit einer Wärmepumpe oder Solaranlage für Häuser mit geringem Energiebedarf.

- Für eine hohe Ausbrandqualität ist eine gute Vermischung zwischen Verbrennungsluft und brennbaren Gasen erforderlich. Mit CFD können die Sekundärluft und die Nachbrennkammer optimiert werden. Vorteilhaft sind ein hohes Impulsverhältnis sowie eine hohe Turbulenz. Da dies den Druckverlust erhöht, ist für Naturzug eine gleichmässige Verteilung der Sekundärluft vorteilhaft.
- Gute Strömungsverhältnisse sind notwendig, aber nicht hinreichend. Wichtig ist auch eine kontrollierte Leistungsfreisetzung. Die geringe Leistung ist die grösste Herausforderung für Stückholzfeuerungen. Dazu werden die Grundfläche, die Primärluftmenge, der Wärmestrom in die Vergasungszone sowie die Wärmekapazität der Vergasungszone limitiert. ■

www.hslu.ch

www.tiba.ch

* Autoren:

– Prof. Dr. Thomas Nussbaumer ist Professor für Erneuerbare Energien an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw und Inhaber des Ingenieurbüros Verenum in Zürich.
– Peter Odermatt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur in Horw, www.hslu.ch