

Kleinskalige KWK mit einem wirbelschichtgefeuerten Stirlingmotor zur Verstromung von biogenen Reststoffen

T. Schneider¹, D. Müller¹, J. Karl¹

¹Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik (EVT), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Fürther Straße 244f, 90429 Nürnberg, Deutschland, +49 (911) 5302 9038, tanja.t.schneider@fau.de

ABSTRACT

Up to now, major quantities of solid biofuels and residues are still unexploited for small-scale power generation, since they cause severe problems in common grate furnaces, due to high combustion temperatures accompanied by slagging and fouling of heat exchanger surfaces. By small-scale fluidized bed combustion combined with in-bed heat exchanger surfaces of e.g. a Stirling engines, an efficient combustion cooling enables higher combustion efficiencies due to a reduction of excess air, without exceeding ash melting temperatures. This concept is adapted by the Chair of Energy Process Engineering (EVT) at Friedrich-Alexander University Erlangen-Nuremberg and transferred to an innovative, efficient and fuel flexible micro-scale CHP plant concept developed during the last years. After comprehensive experiments with a lab-scale plant, in the funded project "BioWasteStirling" a pilot plant consisting of a 45 kW_{th} fluidized bed combustion and a 5 kW_{el} Stirling engine from Frauscher Thermal Motors was designed. The first experiments show promising results as CO- and fine dust emissions are below the national limits (1. BImSchV) and the electrical efficiency could be increased up to 15 %, while the overall efficiency is more than 80%. Further long-term tests in a field test environment at SWW Wunsiedel with different woody fuels as well as various solid biogenic residues shall demonstrate the long-term stability and provide further details about ash and bed material handling issues.

Keywords: Fluidized bed combustion, biomass, CHP, Stirling engine

1. Einführung

Große Potenziale biogener Festbrennstoffe bleiben bisher vor allem in der kleinskaligen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ungenutzt, obwohl sie einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion von CO₂-Emissionen leisten können. Grund dafür sind in erster Linie die für hohe Wirkungsgrade notwendigen hohen Verbrennungstemperaturen in derzeit verfügbaren Rostfeuerungen, welche zu einer Überschreitung der Ascheschmelztemperaturen und damit zu Verschlackungen und Anbackungen an eingebrachten Wärmeübertragerflächen führen. Um solchen Anbackungen entgegenzuwirken und die

Verbrennungstemperaturen zu senken, wird normalerweise ein hoher Luftüberschuss genutzt, was wiederum die Minderung des elektrischen Wirkungsgrades zur Folge hat [1], [2].

Wirbelschichtfeuerungen hingegen weisen einige Vorteile auf, wodurch die bereits genannten Probleme vermieden werden können: eine homogene Temperaturverteilung im Wirbelbett, hohe Wärmeübergangskoeffizienten aufgrund der Partikelkonvektion und ein stabiles Temperaturniveau durch die hohe Wärmekapazität des Bettmaterials. Hot Spots werden somit effektiv vermieden, während Temperaturen im Bett

konstant zwischen 700-900 °C liegen. Darüber hinaus können CO- und NO_x-Emissionen sehr gut über die gezielte Zugabe von Sekundärluft im Freeboardbereich gesteuert werden [3], [4]. Kombiniert man dies mit einer effizienten Kühlung durch Tauchheizflächen zur direkten Wärmeauskopplung aus dem Wirbelbett, wie z.B. die eines Stirlingmotors, kann der Luftüberschuss ohne Überschreitung der Ascheschmelztemperaturen gesenkt und letztlich eine Wirkungsgradsteigerung erreicht

werden, während zusätzlich ein breiteres Brennstoffspektrum eingesetzt werden kann (s. Abbildung 1) [5], [6].

Bisher werden Wirbelschichtfeuerungen allerdings vor allem in großen Leistungsbereichen eingesetzt (> 1 MW). Um die Vorteile von Wirbelschichten auch für die Mini- und Mikro-KWK nutzen zu können, müssen die Leistungsbereiche ebenfalls adaptiert und kleinskalige Lösungen entwickelt werden.

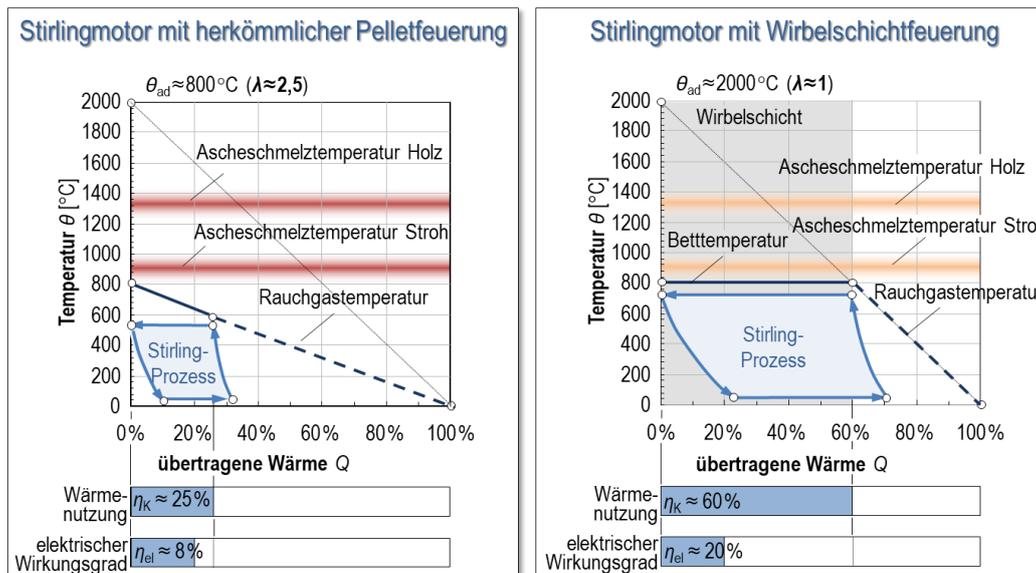


Abbildung 1 Thermodynamischer Vergleich eines Stirlingprozesses bei der Koppelung mit einer herkömmlichen Pelletfeuerung und einer Wirbelschichtfeuerung [vgl. 7]

2. State-of-the-Art

Zur Nutzung von Stirlingmotoren in Kombination mit Biomassefeuerungen gibt es bereits umfangreiche Forschungsarbeiten, wobei die ersten vielversprechenden Ergebnisse seit 1990 von der University of Denmark erzielt wurden. Diese entwickelte zusammen mit Stirling DK, BIOS Bioenergiesysteme GmbH und MAWERA einen 35 kW_{el} Stirlingmotor, welcher in ersten Langzeittests bereits 10 % elektrischen Wirkungsgrad erreichte. Die Erhitzerkopf- flächen des Motors waren im Ausbrandbereich einer Rostfeuerung eingebracht. Aufgrund auftretender Verschlackungsprobleme war allerdings eine periodische Abreinigung

notwendig [8], [9]. Im Weiteren wurde dann die Rostfeuerung durch einen Gegenstrom- vergaser ersetzt, was sich sowohl auf den elektrischen Wirkungsgrad als auch die Wartungsintervalle positiv auswirkte [10].

Ein vergleichbarer Ansatz wurde von der Qalovis GmbH verfolgt, welche einen 35 kW_{el} Vierzylinder-Stirlingmotor von Stirling Biopower Inc. mit einem Gleichstromvergaser kombinierte. Trotz hoher Feinstaubbelastung, der ebenfalls mit einer automatisierten Abreinigung entgegengewirkt wurde, konnte ein Prototyp erfolgreich mit Holzhackschnitzeln betrieben werden [11].

Darüber hinaus wurden verschiedene Konzepte mit Pelletkesseln verfolgt, u.a. auch von Stirling Power Module (SPM), die einen 1 kW_{el} Stirlingmotor zur Erweiterung von Pelletkesseln ($15 \text{ kW}_{\text{th}}$) bereitstellten [12]. Aktuell vertreibt die Firma ÖkoFEN ein Pellet-BHKW bestehend aus einem 1 kW_{el} Freikolbenstirling der Firma Microgen integriert in den eigenen kommerziell verfügbaren 9 kW_{th} Pelletkessel, wobei Betriebserfahrungen eine max. elektrische Leistung von 600 W zeigen [13].

Die Firma Sunmaschine vertrieb dagegen ein eigenkonzipiertes Micro-BHKW, welches aus einer Vergasungskammer für die Holzpellets und einer Nachbrennkammer besteht, in dem wiederum die Erhitzerkopfflächen des 3 kW_{el} Stirlingmotors positioniert sind. In Vorserienanlagen wurden durch die integrierte Luftvorwärmung und nahstöchiometrische Betriebspunkte elektrische Wirkungsgrade bis ca. 15% erreicht. Allerdings kam es auch bei diesem Konzept zu Verschmutzungen der Wärmeübertragerflächen und verkürzten Wartungsintervallen [14].

3. Konzept & Vorarbeiten

Das vorgestellte Konzept, die Wärmeübertragerflächen eines Stirlingmotors direkt im Wirbelbett zu positionieren (s. Abbildung 2), ist am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik (EVT), bereits seit einigen Jahren Gegenstand der Forschungsarbeiten.

Die Herausforderungen bei der Projektierung eines solchen Anlagentyps liegen zum einen bei der Skalierung von Wirbelschichtfeuerungen in den kleinen Leistungsbereich, aber auch bei der Notwendigkeit einer kompakten Bauweise der Gesamtanlage, um im Mini-KWK-Bereich konkurrenzfähig zu sein. Bei der Kopplung einer Wirbelschichtfeuerung mit einem Stirlingmotor müssen zudem die bekannten Nachteile aus großskaligen Wirbelschichten,

wie Erosion und hoher Eigenenergiebedarf, kritisch betrachtet werden.

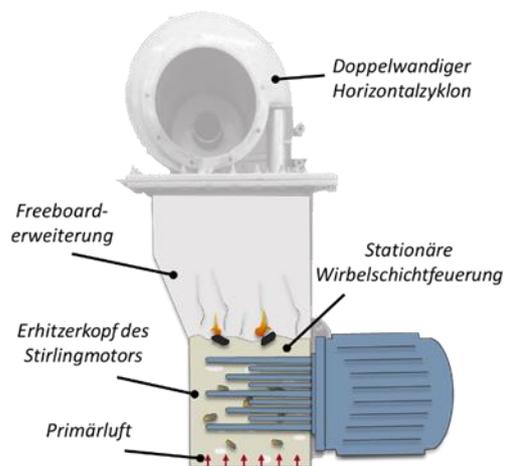


Abbildung 2 Schematische Anordnung des Wärmeübertragers eines Stirlingmotors im Bett einer Wirbelschichtfeuerung mit Horizontalzyklon (eigene Darstellung)

Im Zuge dessen wurde am EVT eine Mikro-KWK-Anlage im Labormaßstab entwickelt, bestehend aus einer $30 \text{ kW}_{\text{th}}$ Wirbelschichtfeuerung gekoppelt mit einem 3 kW_{el} Stirlingmotor der Firma Sunmaschine. Um eine kompakte Bauweise zu ermöglichen und gleichzeitig eine effektive Partikelrückführung sicherzustellen verfügt das Anlagenkonzept über einen Horizontalzyklon, welcher mittels numerischer Simulationen ausgelegt und optimiert wurde [15].

Durch die Skalierung der Wirbelschicht auf eine Feuerungswärmeleistung von $30 \text{ kW}_{\text{th}}$ ergeben sich nur noch Betthöhen von $200 - 300 \text{ mm}$, was zu geringen Druckverlusten zwischen $20 - 30 \text{ mbar}$ führt und dem Standard bei üblichen Pelletkesseln entspricht. Auch die Partikelgeschwindigkeiten in kleinskaligen Wirbelschichten sind um ein Vielfaches geringer ($0,03 - 0,5 \text{ m/s}$), wodurch Erosionsschäden an eingebrachten Tauchheizflächen vermieden werden können. Dies kann auch durch die bisherigen Beobachtungen bestätigt werden [16].

Durch die effiziente Kühlung der Feuerung durch den eingebrachten Erhitzerkopf des

Stirlingmotors, werden konstante Verbrennungstemperaturen zwischen 750 – 850 °C in der Wirbelschicht bei nahstöchiometrischen Betriebspunkten erreicht. Somit können hohe Feuerungswirkungsgrade realisiert werden, während die charakteristisch niedrigen Ascheschmelztemperaturen von biogenen Festbrennstoffen nicht überschritten werden. Zusätzlich verhindert die konstante Bewegung des Bettmaterials Anbackungen an den Wärmeübertragerflächen.

Des Weiteren zeigten die durchgeführten Laborversuche mit Holzpellets, dass sowohl die CO- als auch Feinstaubemissionen unter den entsprechenden Grenzwerten der 1. BImSchV liegen, wobei hinsichtlich der CO-Emissionen ein charakteristischer Verlauf in Abhängigkeit des Luftüberschusses mit einem Minimum bei $\lambda \approx 1,4 - 1,5$ festgestellt wurde. Eine Verringerung der Verbrennungstemperatur hat zudem eine Erhöhung der CO-Emissionen zur Folge. Insgesamt wurden während dem Laboranlagenbetrieb bereits elektrische Wirkungsgrade von 10 % erreicht [7].

Allerdings können mit Kurztests in einer Laborumgebung die dringend benötigten Langzeiterfahrungen bezüglich der weiter zu entwickelnden Subkomponenten, vor allem hinsichtlich der Partikel- und Ascheabscheidung, sowie dem Bettmaterialmanagement, nicht gewonnen werden.

4. Projekt „BioWasteStirling“

Daher wird das Konzept basierend auf den Laborergebnissen aktuell im Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ im Zuge des BMWi-Projekts „BioWasteStirling“ zu einer hocheffizienten, skalierbaren und brennstoffflexiblen KWK-Anlage im Pilotanlagenmaßstab weiterentwickelt. In die optimierte 45 kW_{th} Wirbelschichtfeuerung wurde ein 5 kW_{el} Stirlingmotor des Projektpartners Frauscher Thermal Motors integriert (s. Abbildung 3) und soll im Rahmen eines Feldtests auch im

Dauerbetrieb bei den Stadtwerken Wunsiedel (SWW) erprobt werden [17].

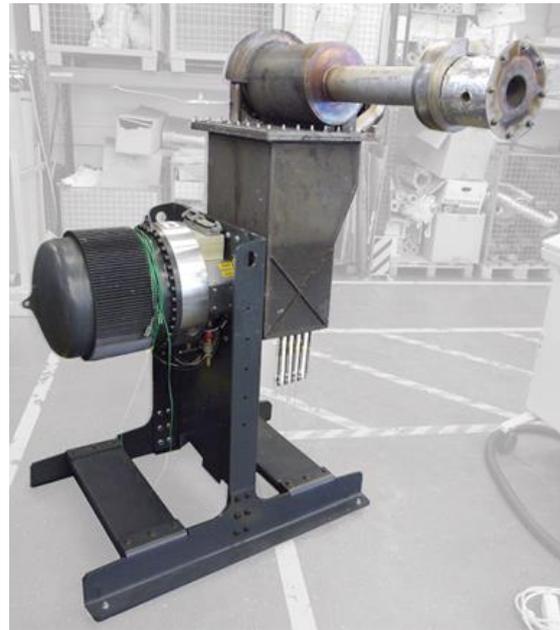


Abbildung 3 Pilotanlage mit einer 45 kW_{th} Wirbelschichtfeuerung, Horizontalzyklon und 5 kW_{el} Stirlingmotor (hier ohne Instrumentierung & Isolierung)

Im Fokus stehen dabei zunächst Langzeitversuche mit verschiedenen holzartigen Brennstoffen, sowie im Weiteren pelletierten Festbrennstoffen aus dem Bereich der herausfordernden biogenen Reststoffe wie beispielsweise Gärreste, Restkohlenstoff aus der Vergasung, Klärschlamm-, sowie Heu- und Strohpellets.

Für den eingesetzten Horizontalzyklon existiert bisher noch keine Auslegungsvorschrift. Daher hat ein weiteres Arbeitspaket die simulationsbasierte Weiterentwicklung des verwendeten Horizontalzyklons zum Ziel. Die damit erhaltenen Ergebnisse sollen durch verschiedene Versuche in Zusammenarbeit mit dem Technologie- und Förderzentrum Straubing (TFZ) validiert werden und der damit verbundene Ascheaustrag sowie das Bettmaterialmanagement in der kleinskaligen Feuerung bzgl. der Partikelgrößenverteilung charakterisiert werden.

Projektbegleitet findet die genehmigungsrechtliche und wirtschaftliche Betrachtung des Anlagenkonzepts hinsichtlich verschiedener

Einsatzszenarien statt, wobei die erzielten Ergebnisse aus den Dauerlaufversuchen als Basis für Modellrechnungen für die Wirtschaftlichkeit und die Definition von praxisrelevanten Last- und Einsatzprofilen dienen sollen.

5. Bisherige Ergebnisse

Vorbereitend für den Feldtestbetrieb wurde die optimierte Pilotanlage in Laborumgebung in Betrieb genommen und die Charakterisierung der Feuerung und des Stirlingmotors abgeschlossen.

Die erste Inbetriebnahme zeigte bereits, dass der Motor von Frauscher Thermal Motors (FTM) in Kombination mit der Wirbelschichtfeuerung seine Nennleistung von 5 kW_{el} erreicht. Bei einer Feuerungswärmeleistung von rund 40 kW_{th} erzielte das Konzept dementsprechend einen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 12,5 %.

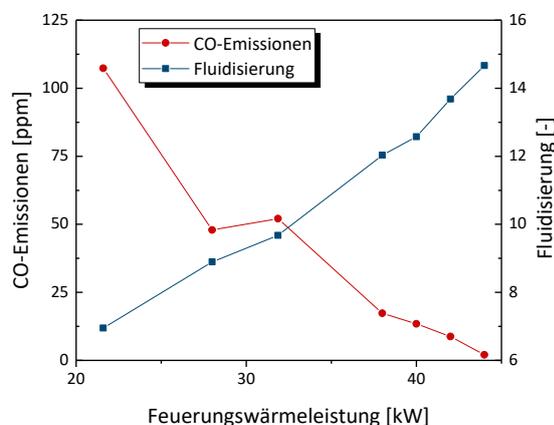


Abbildung 4 CO-Emissionen (unverdünnt) abhängig von der Feuerungswärmeleistung (Holzpellets, Luftüberschuss $\lambda = 1,5$, Betttemperatur = 800°C)

Eine weitere Charakterisierung der Wirbelschichtfeuerung hat ergeben, dass die CO-Emissionen ebenfalls unter den anzusetzenden Grenzwerten (1. BImSchV) liegen und gegenüber der Laborablage nochmals reduziert werden konnten. Dabei zeigt sich eine charakteristische Abhängigkeit von dem Luftüberschuss Lambda, welcher bei Betttemperaturen von 800°C ebenfalls zwischen

$\lambda \approx 1,4-1,5$ liegt. Darüber hinaus führt eine Erhöhung der Querschnittsbelastung zu einer weiteren Reduktion der CO-Emissionen (s. Abbildung 4).

Neben den Versuchen mit Holzpellets wurden bereits erste Laborversuche und Feinstaubmessungen mit Holzmischpellets (30% Weide, 70 % Fichte) als Brennstoff durchgeführt. Wie zu erwarten war, ergeben sich auch hier bei steigender Feuerungswärmeleistung sinkende CO-Emissionen (s. Abbildung 5).

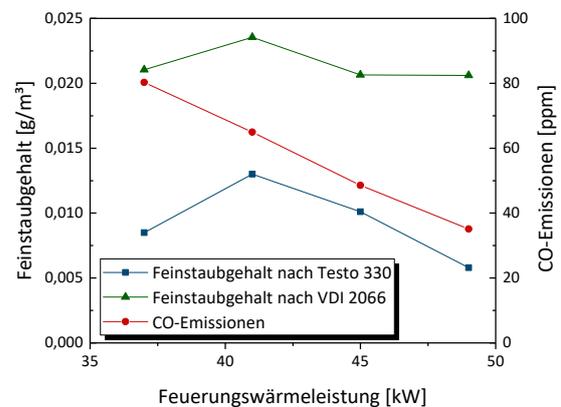


Abbildung 5 CO- und Feinstaubemissionen in Abhängigkeit von der Feuerungswärmeleistung (Mischholzpellets, $\lambda = 1,5$, Betttemperatur = 800°C)

Für die Messung der Feinstaubemissionen wurde zum einen das Kaminkehrermessgerät Testo 330-2 LL (Staubentnahmesonde, Messzeit 15 min) genutzt, während gleichzeitig das Staubmessverfahren nach VDI 2066 mit der Paul Gothe Staubsonde (isokinetische Absaugung auf Quarzfaserfilter, Messzeit 30 min) durch das TFZ durchgeführt wurde. Die Messergebnisse lassen ebenfalls einen negativen Trend mit steigender Feuerungswärmeleistung erkennen, allerdings ist eine systematische Abweichung zwischen den Ergebnissen des Testo 330 und der Gesamtstaubmessung nach VDI 2066 in der Größenordnung $0,01 \text{ g/m}^3$ festzustellen. Die geringeren Messwerte des Testo 330 sind möglicherweise durch die fest eingestellte Absaugrate des Geräts zu erklären, die im Vergleich zu den hohen Rauchgeschwindigkeiten als zu gering erscheinen

kann. Dennoch liegen beide Messreihen im Bereich des Grenzwertes nach der 1. BImSchV (s. Abbildung 5). Diese Diskrepanz wird in den kommenden Messkampagnen noch detailliert untersucht werden müssen.

Im Hinblick auf eine weitere Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades wurde das Quarzsandbett (HR 0,1-0,6T) anteilig mit dem sauerstoffspeichernden Material Ilmenit, eine Mischung aus Eisenoxid und Titandioxid, ersetzt. Durch eine gleichmäßigere Sauerstoffverteilung im Bett, kann der Wärmefreisetzungsanteil in der Wirbelschicht erhöht und damit eine Reduktion der eingesetzten Brennstoffmenge erreicht werden. Dies spiegelt sich in den ersten Laborversuchen in der Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades auf ca. 15 % wieder. Weitere Messungen zur Validierung und Optimierung des Bettmaterialanteils je nach Brennstoff sind hierzu notwendig.

Um darüber hinaus die noch vorhandene Wärme aus dem Rauchgas weiter nutzbar zu machen, wurde die Pilotanlage um einen Rauchgaswärmeübertrager der Firma ÖkoFEN erweitert. In ersten Tests konnten so mit der Mikro-KWK-Anlage bereits Brennstoffausnutzungsgrade größer 80% erreicht werden.

6. Zusammenfassung

Aufbauend auf umfassenden Forschungsergebnissen der letzten Jahre wurde am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik im Rahmen des Projekts „BioWasteStirling“ eine hocheffiziente, brennstoffflexible KWK-Anlage im Pilotmaßstab mit einer $45 \text{ kW}_{\text{th}}$ Wirbelschichtfeuerung und ein 5 kW_{el} Stirlingmotor aufgebaut und im Labor charakterisiert. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die CO-Emissionen sowie die Feinstaubemissionen unter bzw. im Bereich der Grenzwerte nach der 1. BImSchV liegen. Darüber hinaus wurden

weitere Wirkungsgradsteigerungen bis ca. 15 % gegenüber der Laboranlage erreicht.

Die Pilotanlage wird nun in der Feldtestumgebung beim Projektpartner SWW Wunsiedel installiert, sodass in Langzeitversuchen das Dauerlaufverhalten der Anlage sowie die Brennstoffflexibilität demonstriert werden können.

7. Quellen

- [1] C. Yin, L. A. Rosendahl, and S. K. Kær, "Grate-firing of biomass for heat and power production," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 34, no. 6, pp. 725–754, 2008.
- [2] B. Gatternig and J. Karl, "Ascheproblematik in biomassegefeuerten Wirbelschichtanlagen," in *11. Symposium Energieinnovation*, 2010.
- [3] I. Obernberger, "Decentralized Biomass Combustion State of the art and future development," *Biomass and Bioenergy*, vol. 14, no. 1, pp. 33–56, 1998.
- [4] F. Winter and P. Szentannai, "Brennstoffmix in Wirbelschichtfeuerungen: Status und Entwicklungstendenzen," pp. 1–13, 2009.
- [5] E. Cardozo, C. Erlich, A. Malmquist, and L. Alejo, "Integration of a wood pellet burner and a Stirling engine to produce residential heat and power," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, no. 1, pp. 671–680, 2014.
- [6] J. Werther, M. Saenger, E. U. Hartge, T. Ogada, and Z. Siagi, "Combustion of agricultural residues," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–27, 2000.
- [7] D. Müller, "Kleinskalige Wirbelschichtfeuerungen zur Kraft-Wärme-Kopplung mit Stirlingmotoren," Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2018.
- [8] G. Marinitsch, F. Biedermann, H. Carlsen, J. K. Bovin, and M. Schöch, "Development of a hot gas heat exchanger and a cleaning system for a $35 \text{ kW}_{\text{el}}$ hermetic four cylinder Stirling engine for solid biomass fuels," in *International Stirling Engine Conference*,

2005.

- [9] F. Biedermann, H. Carlsen, I. Obernberger, and M. Schoch, "Small-Scale CHP Plant Based on a 75 kWel Hermetic Eight Cylinder Stirling Engine for Biomass Fuels — Development , Technology and Operating Experiences," *2nd World Conf. Exhib. Biomass Energy, Ind. Clim. Prot.*, no. January, pp. 1722–1725, 2004.
- [10] N. Jensen, J. Werling, H. Carlsen, and U. B. Henriksen, "CHP from Updraft Gasifier and Stirling Engine," *Proc. 12th Eur. Biomass Conf.*, pp. 726–729, 2002.
- [11] M. Hülscher, "Die Anlagenkombination Biomassevergaser und Stirlingmotor – Betriebsverhalten und praktische Erfahrungen Zusammenfassung Einleitung und Systemaufbau," in *20. Symposium "Bioenergie - Festbrennstoffe,"* 2011.
- [12] K. Stanzel, "Jedem sein Kraftwerk - Das 1kWe spm-Modul im Feldtest," in *2. Deutscher Stirling-Kongress,* 2008.
- [13] R. Pargfrieder, "ÖkoFEN_e Strom und Wärme aus Pellets," in *Stirling-Forum 2016,* 2016.
- [14] B. Deicheleweier, "Abschlussbericht Holzpellet-BHKW in einem Mehrfamilienhaus in Freiburg, Projektnummer 2007-07," 2011.
- [15] D. Müller and J. Karl, "Biomass CHP with micro-fluidized-bed combustion," in *21st European Biomass Conference &*

Exhibition, 2013.

- [16] D. Müller, T. Plankenbühler, and J. Karl, "Small-scale CHP with Stirling Engines based on fluidized-bed combustion of biomass," in *17th International Stirling Conference,* 2016.
- [17] T. Schneider, D. Müller, and J. Karl, "Biomass conversion with a fluidized bed-fired stirling engine in a micro-scale chp plant," *Eur. Biomass Conf. Exhib. Proc.*, vol. 2018, no. 26thEUBCE, pp. 630–634, 2018.

8. Acknowledgement

Das vorgestellte Projekt wird im Rahmen des Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ des Bundeswirtschaftsministeriums Deutschland gefördert.

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag



Energetische
Biomassenutzung

Weitere Projektpartner sind Frauscher Thermal Motors, die Stadtwerke Wunsiedel und das Technologier- und Förderzentrum Straubing.

