

DISS. ETH N° 18865

– GRASS FOR POWER GENERATION –  
EXTENDING THE FUEL FLEXIBILITY  
FOR IGCC POWER PLANTS

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

JOHANNES W. JUDEX

Dipl.-Ing. TU-Berlin

Born on

July 6<sup>th</sup> 1977

Citizen of Germany

accepted on the recommendation of

PROF. DR. ALEXANDER WOKAUN

PROF. DR. MASSIMO MORBIDELLI

DR. SERGE M. A. BIOLLAZ

2010

# Abstract

The situation of the current electrical power production is characterised by a trend to use more and more alternative energies and the fact that the European power plant fleet is ageing. Since the electrical consumption is expected to increase further, old power plants which are to be switched off need to be replaced. There are two main candidates of large power plant types being discussed:

- ✧ natural gas combined cycle plants
- ✧ nuclear power plants

Nuclear power plants are not suited to implement alternative energies, whereas combined cycle power plants can be equipped with a biomass gasifier. In this way an IGCC power plant is designed, which can fully or partially run on biomass. There is also a need to employ additional biomass feed stock types like annual plants. In this work grass is studied as additional energy resource for IGCC applications. Being able to use grass as supplementary feed stock would increase the fuel flexibility of IGCC power plants.

- ✧ A review of the chemical and physical properties of grass as solid fuel was carried out. Grass contains a very large number of different inorganic elements mostly in minor amounts. It revealed that in addition to the elements causing corrosion in gas turbines at least Sr and Ba are found in grass. Both show similar corrosiveness to the known alkalis K and Na. Earth alkali elements (Mg, Ca) also being known for depositions and corrosion enhancement, are present in critical amounts in the fuel. It is unsure whether the positive effects (binding sulphur or vanadium) or the negative effects (deposition, surface damage) will prevail. The generally low energy density can be avoided by on-field densifica-

tion or immediate pyrolysis. The water content can be expected to be lower than for all other biomasses owing to good drying properties and the possibility of on-field drying.

- ✧ For the integration into IGCC power plants the grass must be thermally gasified. A lab-scale fluidised bed gasification reactor was designed and put into operation. Air blown gasification experiments were conducted with grass and thereby the stability of the process and emission of contaminants, relevant for gas turbine applications, was analysed (i. e. K, Na, Mg, Ca, Pb, V).
- ✧ Gasification experiments were carried out between 700 and 750 °C for fuel to air ratios between 0.17 and 0.35. Different bed materials (dolomite, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) were tested: dolomite was excluded after first trials, because it appeared unsuitable for fluidised bed applications due to its mechanical weakness. Silica sand was used for 700 °C only since the ash melting behaviour of grass together with silica indicated agglomeration above 700 °C. The experiments at this temperature were conducted without bed agglomeration or defluidisation. Alumina bed material was used for 700 and 750 °C, since the ash melting behaviour of grass together with alumina proved to be less critical at higher temperatures. A 10 h run was conducted to see if unstable situations in the gasification process can occur. All experiments succeeded without any defluidisation or agglomeration. Axial temperature profile measurements proved an isothermal behaviour. The axial devolution of the superficial gas velocity is evident but still moderate. Despite the low temperature of 700 to 750 °C, the tar concentration is lower than for fluidised bed wood gasification given in literature.
- ✧ The contaminants in the gas phase were analysed by means of a dedicated sampling train and an ICP-OES device. It was shown that by applying a hot gas filter at 400 °C all the contaminant concentrations aside from potassium and sodium were low enough to satisfy the gas turbine limits. Sodium was found in concentrations higher than the allowed limit for mono-fuel applications. The concentrations are low enough if a cofiring approach with natural gas is targeted. Potassium could not be quantified at the given concentration level due to the insensitive response of the ICP-OES to potassium. Secondary measures other than hot gas clean up to reduce contaminants were not employed.

- ✧ A novel single pellet gasifier was designed and commissioned in order to investigate the transient gasification of a single pellet. The reactor showed similar characteristic as the fluidised bed with respect to gas devolution, fuel size and heating rate of the fuel. The experiments proved to be fully reproducible. By means of a surface ionisation detector, the alkali emission for different grass pellets was monitored qualitatively. The results revealed that around 90% of the alkalis are emitted during the combustion phase of the char. The remaining 10% are released due to the volatilisation during the pyrolysis and gasification. Leaching and doping with potassium and sodium of the grass influenced the emission during the combustion phase much stronger than during the volatilisation. The implementation of a hot gas filter at 400 °C resulted in a heavily reduced alkali emission. The results indicated, that the passing alkali fraction is released during the pyrolysis, whereas the larger fraction emitted from the char combustion could be separated.

Grass is by any means suitable to be gasified in a fluidised bed gasifier. Hot gas filtration at 400 °C is sufficient if the cofiring concept is followed. However, secondary measures are required to further reduce the sodium concentration if the mono-fuel concept is chosen.

# Kurzfassung

Die momentane Situation der Elektrizitätsproduktion ist gekennzeichnet durch die Tendenz steigender Anteile an erneuerbaren Energien sowie eine stetige Veralterung des europäischen Kraftwerksparks. Kraftwerke, die altersbedingt vom Netz genommen werden, müssen durch neue und effizientere Kraftwerke ersetzt werden. Da ein weiterer Anstieg des Elektrizitätskonsums erwartet wird, müssen zudem zusätzliche Kraftwerke geschaffen werden. Zur Zeit sind zwei Kraftwerkstypen vorzugsweise in der Diskussion.

- ✧ Erdgas gefeuerte Gas- und Dampfkraftwerke (GuDs) und
- ✧ Atomkraftwerke der neusten Generation

In Atomkraftwerke können keine erneuerbaren Energien im Sinne eines Ersatzes implementiert werden. Im Gegensatz dazu können in GuDs Biomassevergaser integriert werden, die beliebige Teile des ansonsten verwendeten Erdgases durch sogenanntes Syngas ersetzen können. Die Vergaser werden heute in der Regel mit Kohle betrieben, lassen aber die Möglichkeit offen auch Biomasse einzusetzen.

Aufgrund der zum Teil mangelnden Verfügbarkeit herkömmlicher Biomasse (Holz, Restholz) besteht die Notwendigkeit zusätzliche Ressourcen wie z. B. jährige Pflanzen auf ihre Eignung zu prüfen.

In dieser Arbeit wird die Eignung von naturbelassenem Gras für den Einsatz in GuDs mit integrierter Vergasung überprüft. Die Möglichkeit Gras als Brennstoff zu nutzen würde die Brennstoffflexibilität für zukünftige Anlagen erhöhen. Folgende Bereiche und Themen wurden deshalb in der vorliegenden Dissertation bearbeitet:

- ✧ Eine Übersicht über die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Gras als fester Brennstoff wurde herausgearbeitet

und vergleichend mit anderen festen Bioenergieträgern dargestellt. Gras enthält eine vergleichbar grosse Anzahl an anorganischen Elementen, die meisten davon jedoch in geringen Mengen. Zusätzlich zu den bekannten Elementen wie K, Na, Mg, Ca oder V, die zu Beschädigungen an der Gasturbine führen, sind in der Vergangenheit im Gras Barium und Strontium nachgewiesen worden, die eine ähnliche oder stärkere Korrosivität zeigen als die oben erwähnten Alkalimetalle. Insgesamt sind besonders die Alkali- und Erdalkalimetalle im Gras in kritischen Mengen vorhanden. Aus der Übersicht geht nicht hervor, ob z. B. bei Elementen wie Ca das Binden von Schwefel als positiver Effekt oder eine höhere Emission und letztlich Ablagerung und Oberflächenzerstörung überwiegen werden. Die im Vergleich zu verholzter Biomasse niedrigere Energiedichte von Gras kann teilweise durch das Trocknen auf dem Feld und schnellstmögliche Verdichtung zu Ballen oder Pellets oder durch Pyrolyse kompensiert werden. Durch eine Feldtrocknung kann ein geringerer Wassergehalt erwartet werden, als bei herkömmlichen biogenen Brennstoffen.

- ◇ Für die erfolgreiche Integration in ein GuD mit integrierter Vergasung muss das Gras effizient und problemlos vergast werden können. Um dies zu demonstrieren wurde eine luftbetriebene Wirbelschichtvergasungsanlage im Labormassstab (5kW) aufgebaut und betrieben. Verschiedene Experimente wurden durchgeführt, um die Prozessstabilität zu demonstrieren, sowie die für die Gasturbine relevante Störstoffemission (K, Na, Mg, Ca, Pb, V) nachzuweisen.
- ◇ Vergasungsexperimente wurden für Luft-Brennstoffverhältnisse zwischen 0.17 und 0.35 und Temperaturen zwischen 700 und 750 °C durchgeführt. Verschiedene Bettmaterialien (Dolomit, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) wurden getestet: Dolomit wurde nach den ersten Versuchen ausgeschlossen, da die mechanische Beanspruchung in der Wirbelschicht das Material aufrieb und der verbleibende Staub ausgetragen wurde. Siliziumoxid wurde für Experimente bis 700 °C verwendet, da aufgrund des hohen Kaliumgehaltes von Gras für höhere Temperaturen die Gefahr der Bettagglomeration gegeben ist. Bei dieser Temperatur konnten jedoch alle Experimente ohne Defluidisierung oder Bettagglomerationen durchgeführt werden. Aluminiumoxid wurde für Temperaturen bis 750 °C verwendet, da für diese Temperatur noch keine Gefahr der Ascheschmelze ge-

geben ist. Ein 10 h Langzeitversuch wurde durchgeführt, um für eine längere Zeitspanne die Prozessstabilität zu demonstrieren. Alle Experimente wurden ohne Probleme wie Defluidisierung oder Ascheagglomerationen durchgeführt. Durch axiale Profilmessungen wurde eine gute thermische Durchmischung nachgewiesen. Trotz der niedrigen Prozesstemperatur ist der Teergehalt niedriger als für die in der Literatur angegebene Wirbelschichtvergasung für Holz.

- ✧ Die Störstoffe in der Gasphase wurden mit Hilfe eines eigens dafür optimierten Probenahmesystems und eines ICP-OES online und offline analysiert. Durch die Anwendung eines Warmgasfilters bei 400 °C, waren alle Störstoffkonzentrationen mit Ausnahme von Kalium und Natrium niedrig genug, um die Gasturbinenrichtlinien einzuhalten. Die Konzentration von Natrium war geringfügig zu hoch, um die Grenzwerte für ein rein gasbetriebenes GuD (Graskraftwerk) einzuhalten. Kalium konnte aufgrund der geringen Sensitivität des Messgerätes nicht nachgewiesen werden. Die Nachweisgrenze war zudem zu hoch, um eine ausreichend niedrige Konzentration für ein Graskraftwerk zu messen. Alle Konzentrationen sind jedoch ausreichend niedrig, um ein GuD zu betreiben, in dem 10 % des Heizwertes durch die Vergasung von Gras, der Rest durch Erdgas zur Verfügung gestellt wird. Sekundärmassnahmen um die Störstoffkonzentration zu beeinflussen, wurden mit Ausnahme des Warmgasfilters nicht eingesetzt. Solche Massnahmen müssen jedoch eingesetzt werden, um die Grenzwerte für ein Graskraftwerk zu erreichen.
- ✧ Ein neuartiger Einpellet-Reaktor wurde konstruiert, um die transiente Vergasung eines einzelnen Pellets zu beobachten. Der Vergaser zeigte eine ähnliche Charakteristik wie die Wirbelschicht hinsichtlich der Brennstoffgrösse, Heizrate und Gasentwicklung während der Pyrolyse. Durch die Verwendung eines Oberflächenionisierungssensor (engl. SID) konnte die Alkali (K + Na) Emission qualitativ während der Vergasung und Verbrennung eines einzelnen Pellets dokumentiert werden. Die Ergebnisse ergaben, dass die Hauptemission der Alkalien (90 %) während der Restkoksverbrennung stattfindet. Die verbleibenden 10 % werden während der Trocknung, Pyrolyse und Vergasung freigesetzt. Das Auswaschen der Alkalien aus dem Gras sowie das Zusetzen von Alkalien zu dem Gras führte in beiden Fällen hauptsächlich zur

Beeinflussung der 90 % aus dem Reskoks freigesetzten Alkalien. Der Einsatz eines Warmgasfilters bei 400 °C führte erwartungsgemäss zu einer stark reduzierten Alkaliemission. Die durch den Filter passierenden Alkalien stammten aus dem kleinen Anteil, der während der Pyrolyse freigesetzt wird.

Die vorliegenden Untersuchungen haben eindeutig gezeigt, dass sich Gras zur Vergasung in einer Wirbelschicht bei moderaten Temperaturen bis 750 °C sehr gut eignet. Eine Warmgasfiltration des Rohgases bei 400 °C ist ausreichend, wenn das Gas im obigen Sinne in einer Co-Verbrennung mit Erdgas verwendet werden soll. Zusätzliche Sekundärmassnahmen sind jedoch erforderlich, wenn das Gas in einem Graskraftwerk verwendet werden soll.