



Konstruktionsüberlegungen für eine kohlenstofffreie Verbrennung

David Schalles
Michael Cochran
Volkmar Schmucker

Bloom Engineering (Europa) GmbH

Verbrennung - Ein kurzer Überblick

- Kraftstoff (üblicherweise in Form eines Kohlenwasserstoffes)
 - Kohlenwasserstoff: Organische Verbindung bestehend aus Wasserstoff und Kohlenstoff in einem bestimmten Verhältnis, generell in Gasform
 - Methan (CH₄) ist ein üblicher industrieller Kraftstoff
- Sauerstoff (allgemein enthalten in Luft)
- Freisetzung von nutzbarer Prozesswärme

Stöchiometrische Verbrennung



(1000 Btu/scf)

(9400 kcal/Nm³)



Abgase/Verbrennungsprodukte

Kohlenstoff Verbrennung



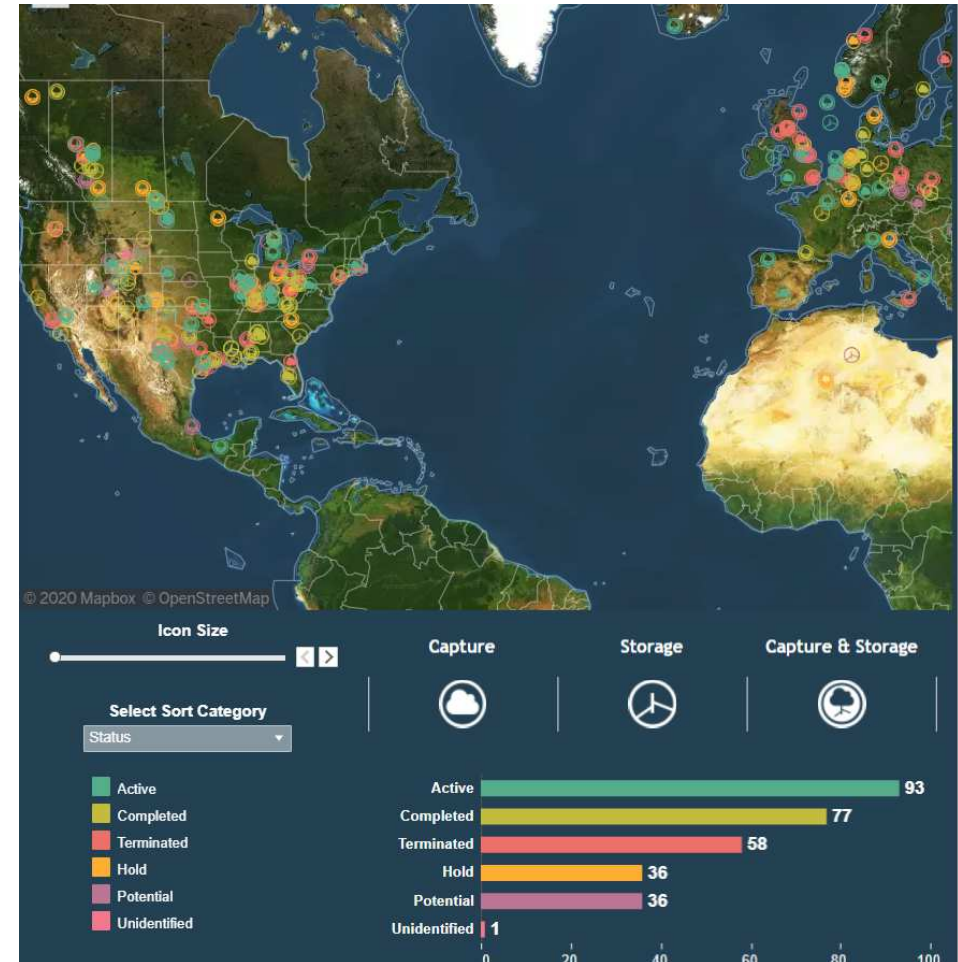
(1000 Btu/scf)

(9400 kcal/Nm³)

- Wasser, Stickstoff und Kohlendioxid
- Unvollständige Verbrennungen können Spuren hinterlassen von:
 - CO
 - Ruß

Mögliche Kohlendioxid Reduktionsmethoden

- Effizientere Verbrennung
 - Weniger Brennstoff wird verbrannt
 - Weniger CO₂
 - Viele Prozesse sind jedoch bereits nahe am theoretischen maximalen thermischen Wirkungsgrad
- Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS/Sequestration)
 - Kohlenstoff aus den Verbrennungsprodukten auswaschen und speichern (oft unterirdisch)
 - Großer Kapitalaufwand
 - Technologieentwicklung ist im Gange



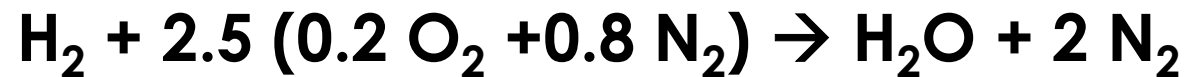
<https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/worldwide-ccs-database>

Mögliche Kohlendioxid Reduktionsmethoden – Weitere Optionen

- Verbrennung von kohlenstofffreien Kraftstoffen
- Wasserstoff – H_2
- Befürworter einer „Wasserstoffwirtschaft“ zur Bekämpfung des Klimawandels plädieren seit mehr als 30 Jahren für Wasserstoff als „idealen, sauber verbrennenden Kraftstoff“¹
- Wasserstoff wurde bisher aufgrund der Produktions- und Transportkosten nicht als praktikabler industrieller Brennstoff angesehen
- Dekarbonisierung als Priorität hat die Situation verändert

¹Bartok, W., and Sarofim, A., *Fossil Fuel Combustion*, Wiley and Sons, 1991.

Was können wir aus der ausgewogenen chemischen Gleichung lernen?



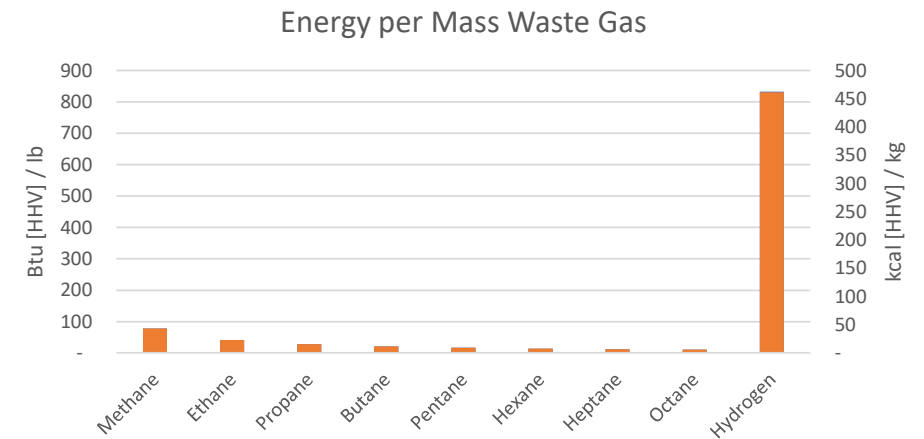
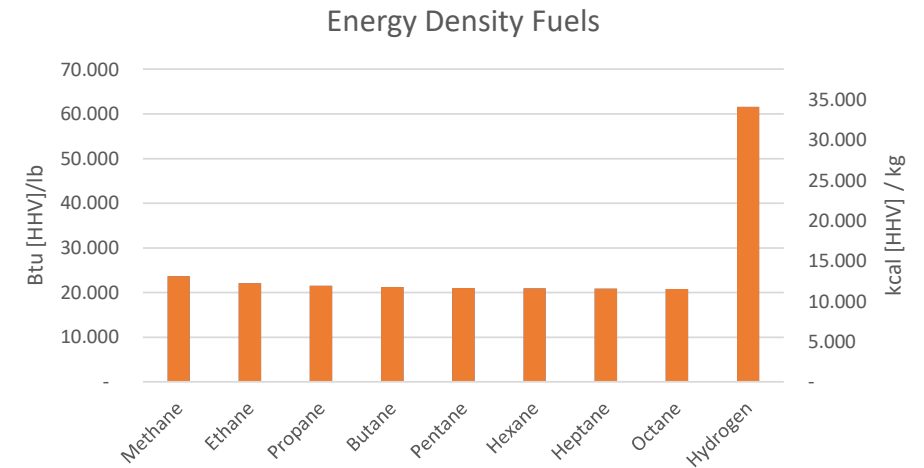
(325 Btu/scf)

(3050 kcal/Nm³)

- Hier ist kein Kohlendioxid zu finden
- Weniger Abgas pro Wärmeeinheit
 - Kohlenstoff Verbrennung: 11 Volumenanteile pro 252 kcal (1000 BTU)
 - Wasserstoffverbrennung: 9.2 Volumenanteile pro 252 kcal (1000 BTU)

Energiedichte

- Verglichen zu üblichen Kohlenwasserstoffen:
 - Mehr Energie pro Masse Kraftstoff
 - Mehr Energie pro Masse Abgas
 - Weniger Masse durch das Kraftstoffversorgungssystem und durch das Abgassystem zu bewegen

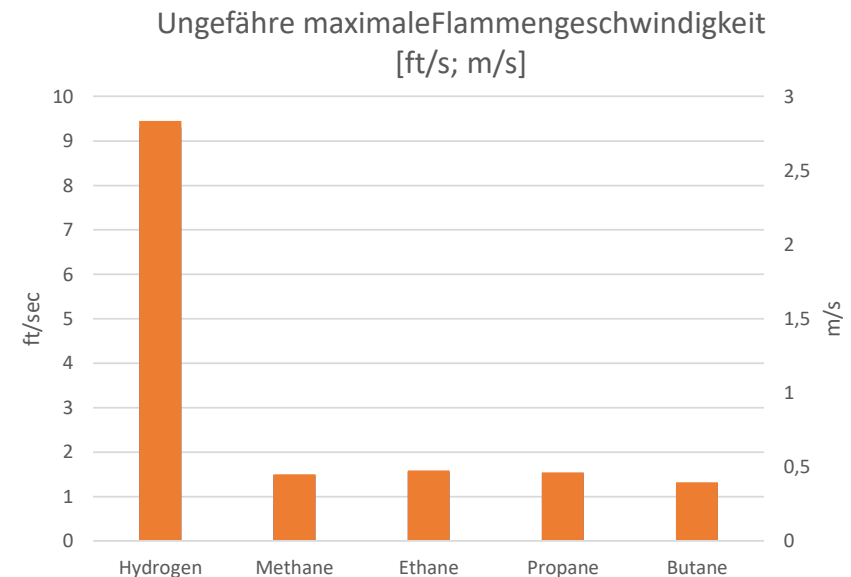


Besondere Überlegungen bei der Entwicklung von Verbrennungslösungen

- Flammengeschwindigkeit
- Flammentemperatur
- Emissionen
- Wärmetransport
- Zündgrenzen
- Sicherheit

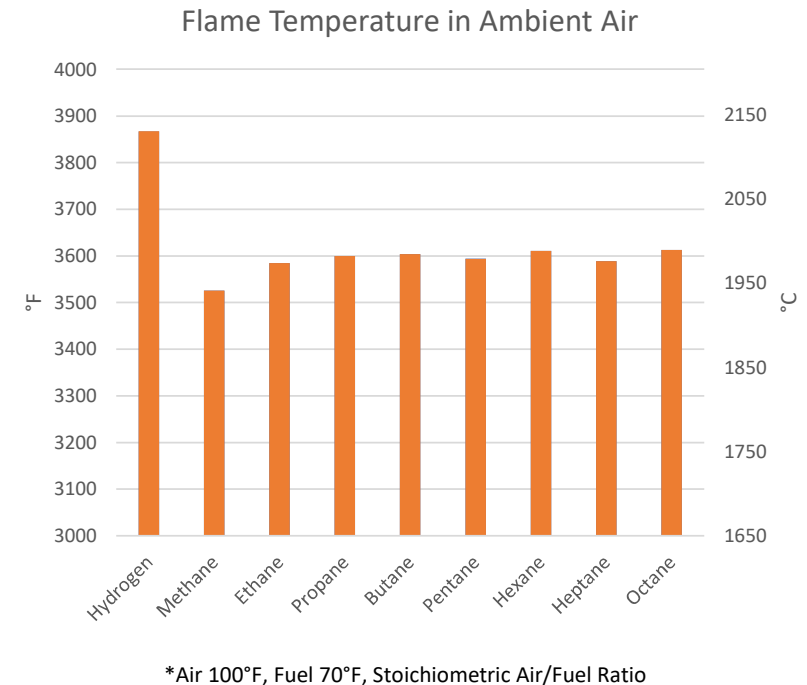
Flammengeschwindigkeit- Auswirkungen

- Flammenrückschlag
 - Die Geschwindigkeit der Luft- und Gasströme treibt Brennstoff und Luft vorwärts, während die Flamme zurück zum Brenner wandert
 - Bei nicht ausreichenden Geschwindigkeiten kann die Flamme rückwärts in den Brenner oder in das Rohrleitungssystem wandern
- Wasserstoff sehr anfällig für Rückschlag
- Brenner muss richtig ausgelegt sein
- Vorhandene Ausrüstung kann umfangreiche Modifikationen oder Austausch erfordern



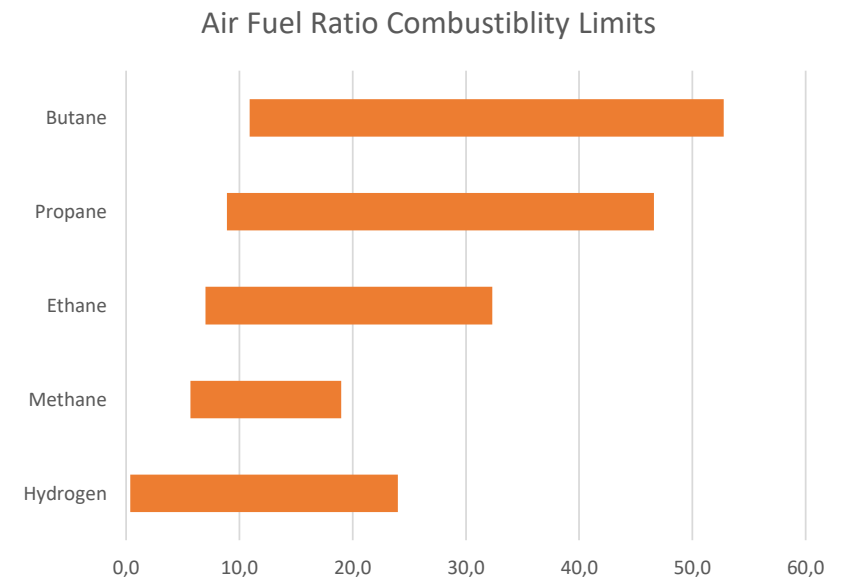
Flammentemperatur

- ~ 140-160°C (250-300°F) höher als bei Kohlenwasserstoffen
- Könnte besondere Konstruktionsüberlegungen erfordern
 - Brennerbaustoffe
 - Ofenwandmaterial
- Zusatzausrüstung
 - Zünder/Zündbrenner
 - Flammenüberwachung



Zündgrenzen(Luft/Kraftstoff Verhältnis)

- Luft/Kraftstoff Gemisch nur innerhalb bestimmter Grenzen brennbar
- Abhängig vom Brennstoff
- Untere Zündgrenze von Wasserstoff ist sehr klein
- Schon eine kleine Menge Wasserstoff in der Luft kann brennbar sein



Wärmetransport

- Wasserstoffflammen enthalten keinen Kohlenstoff
- Es gibt keine sichtbare „Leuchtkraft“, wie sie normalerweise bei vielen Kohlenwasserstoff-Brennstoffflammen zu sehen ist.
- Die direkte Strahlung im sichtbaren Spektrum nimmt ab, was zu einer **Verringerung der Strahlungswärmeübertragung** der Flamme führt.
- **Nicht alle Flammenstrahlung tritt im sichtbaren Spektrum auf**, und die dreiatomigen H₂O-Moleküle selbst sorgen für ein gewisses Maß an Strahlungsübertragung.
- Möglicherweise müssen Tests und/oder Modellierung des Ofens durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die gewünschte Leistung beibehalten wird.

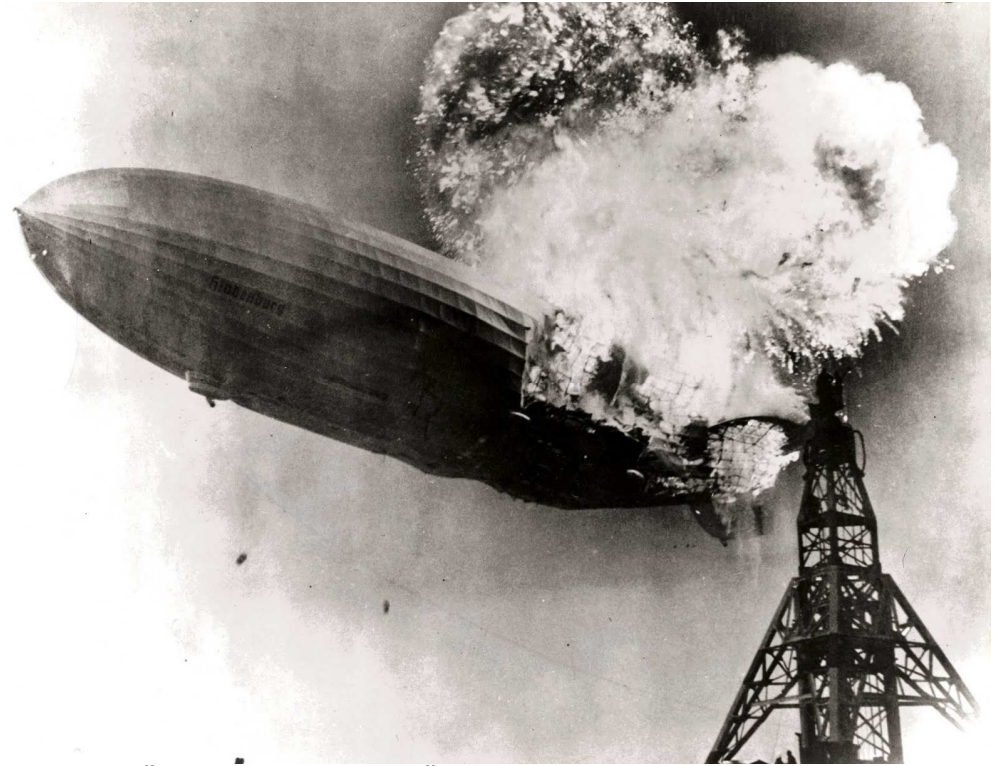
Interessanterweise geschah dies in früheren Epochen, als die Brennstoffe von Kohle über Öl auf Erdgas umgestellt wurden. In jedem Fall musste sich der Ofenkonstrukteur an eine reduzierte Flammenhelligkeit anpassen, während er die gewünschte Produktivität erreichte. Das Problem ist tendenziell bei Retrofit-Anwendungen am ausgeprägtesten und hängt weitgehend von der bestehenden Ofenkonstruktion und Brennerstandorten ab.

Flammensichtbarkeit

- Wasserstoffflammen haben eine sehr geringe Helligkeit
- Visuelle Erkennung schwierig
- Kleine Mengen (2-3 Vol.-%) höherer Kohlenwasserstoffe können Flammen ausreichend leuchtend für eine visuelle Erkennung machen
 - Keine nennenswerten Auswirkungen auf die Kohlenstoffproduktion
 - Kommt natürlich in einigen Prozessgasen vor
- Bewusstes Einbringen durch zusätzliche „Leuchtkraftlanze“

Sicherheit

- Extrem entzündlich
- Extrem schnelle Flammengeschwindigkeiten
- Kleine Moleküle bedeuten, dass Dichtungen leichter undicht werden
- Höhere Geschwindigkeit erfordert höheren Druck
- Flamme kann je nach Bedingungen unsichtbar sein
- Der Geräuschpegel kann über lokale Regelungen hinaus ansteigen



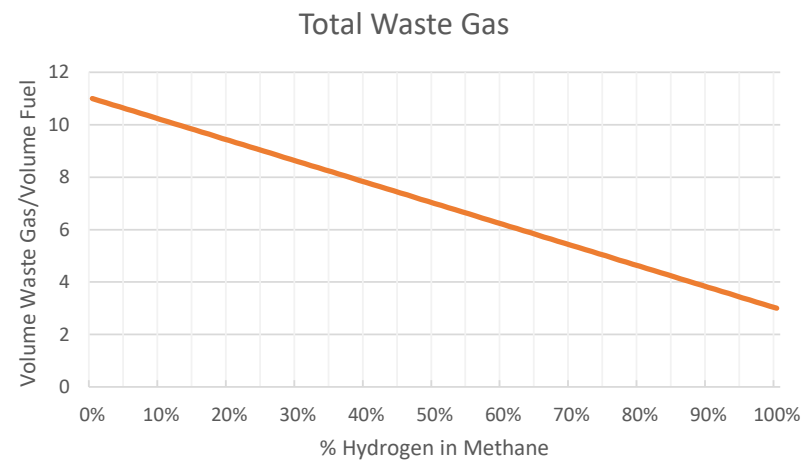
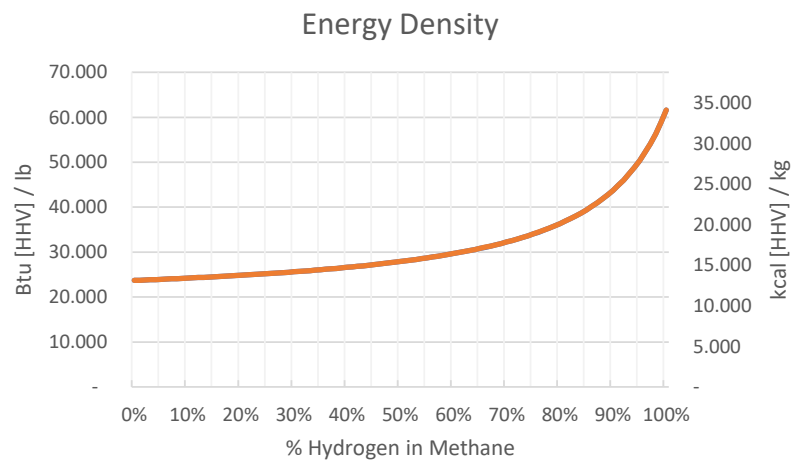
"Hindenburg burning" by Gus Pasquerella -
<http://www.lakehurst.navy.mil/nlweb/images/1213d.gif>.
Licensed under Public Domain via Wikimedia Commons –
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hindenburg_burning.jpg#/media/File:Hindenburg_burning.jpg

Wasserstoff Anreicherung

- Mischen von Wasserstoff in einen weiteren Brennstoff
 - Profitieren Sie von einigen Vorteilen
 - Abmildern von Bedenken
- Nachfolgende Beispiele zeigen die Wasserstoffanreicherung von Methan
- Andere Kohlenwasserstoffe auch möglich
- Die Ergebnisse können variieren, je nachdem, welchen Kohlenwasserstoff der Wasserstoff anreichert
- Die Anreicherung bestehender Wohn-/Gewerbeleitungen kann schwierig sein
 - Viele separate kleinere Geräte erfordern einen enormen Aufwand, um selbst geringfügige Anreicherungen neu abzustimmen/anzupassen.
- Industrieanlagen in regionalen Gebieten sind bessere Kandidaten für die Anreicherung
 - In diesem Fall kommen höhere Anreicherungen oder reines H₂ in Frage

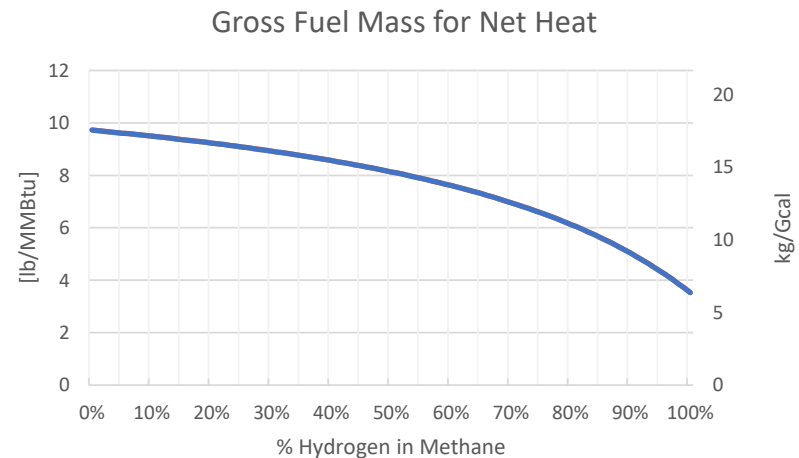
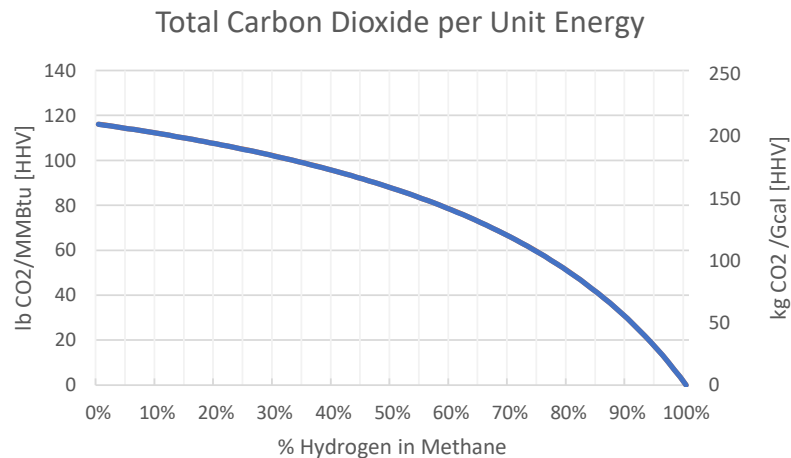
Wasserstoff Anreicherung– Vorteile I

- Vorteile der Energiedichte (wie oben erwähnt) mit Anreicherung verfügbar



Wasserstoff Anreicherung– Vorteile II

- Reduktion von Kohlenstoffdioxid
- Effizienzsteigerung erfordert weniger Bruttowärme



*Estimate based on 2000°F waste gas temperature

Ein wasserstoffangereicherter Brennstoff

- Koksofengas
- Wird in integrierten Stahlwerken auf der ganzen Welt verwendet
- Weit verbreitet in den letzten 100 Jahren (oder mehr)

Eine Perspektive

- Für die Verbrennung von Methan in Luft
 - $1\text{ t CH}_4 \rightarrow 2.75\text{ t CO}_2$ (13,9 MWh/47.4 MMBtu [HHV])
- Für die gleiche Menge an Bruttowärme (13,9 MWh/47.4 MMBtu [HHV]), würde man nur 0.385 t H₂ benötigen
 - Berücksichtigung des Kohlenstoffnachteils bei der Erzeugung
 - $0.38 \times 10\text{ kg Kohlenstoffdioxid/kg Wasserstoff} = 3.85\text{ t CO}_2$
 - 40% Anstieg gegenüber der Verbrennung von Methan
 - Es ist nur schlimmer für andere Brennstoffquellen (Öl und Kohle)
- Punktquelle, damit CCS einfacher zu implementieren ist (theoretisch)

Eine andere Perspektive

- Dieser Nachteil ist nur bei der Erzeugung
- Wenn wir eine natürliche Quelle für reinen Wasserstoff hätten, gäbe es keinen CO₂-Nachteil
- Es wird viel daran geforscht, Wege zu finden, um Wasserstoff wirtschaftlich und nachhaltig zu erzeugen
- Mit der Weiterentwicklung der Technologie könnte Wasserstoff eine attraktivere Option werden
- Derzeit ist die Umwandlung von Methan in Wasserstoff die wirtschaftlichste Quelle, wobei die Elektrolyse und die Nutzung erneuerbarer Quellen eine viel geringere Rolle spielen

Ein anderer Brennstoff

- Ammoniak – NH₃



- Geringe Flammengeschwindigkeit
- Schmalere Entzündungsbereich
- Problem für Umwelt: Geruch, aber sehr gut detektierbar ☺



Wasserstoff – Ein reales Thema

- **Ovako** Stahlwerk verdrängte fossile Brennstoffe in einem Pilotprojekt mit Wasserstoff als Brennstoff
- **Volvo/Daimler** Kooperation für Wasserstoff-Brennstoffzellen-Technologie
- **Alstom** Zugbetrieb mit Wasserstoff-Brennstoffzelle



Wir danken für Ihre Aufmerksamkeit!

Bloom Engineering (Europa) GmbH