

Nordhausen, 17.08.2021

Verfahrensbewertung

Bewertung des "Duplex-TEC-Process®" aus chemisch- verfahrenstechnischer Sicht

Objekt: Duplex-Turbulent-Expansive-Carbonbed-Process
(Duplex-TEC-Process®)

Auftraggeber: TCP Energies GmbH & Co. KG
Sellierstraße 1
07745 Jena

Auftrag Nr.: 1AU-228313

Auftragnehmer: TÜV Thüringen e.V.
Melchendorfer Str. 64
99096 Erfurt

Sachverständige: Dipl.-Ing. W. Timaeus, Dipl.-Ing. (FH) J. Hentrich

Die Verfahrensbewertung umfasst 20 Seiten.

1. AUFGABENSTELLUNG	3
2. VERWENDETE UNTERLAGEN	4
3. STAND DER TECHNIK	5
4. CHEMISCHE REAKTIONEN	8
5. VERFAHRENSTECHNIK	9
6. BEWERTUNG DES VERFAHRENS	11
6.1 Beschreibung des Verfahrens	11
6.2 Chemische Reaktionen	13
6.3 Verfahrenstechnik	15
7. ZUSAMMENFASSUNG	18
8. QUELLENANGABEN	20

1. Aufgabenstellung

Die TCP Energies GmbH & Co. KG Jena beauftragte den TÜV Thüringen e.V. mit der Bewertung des von ihnen entwickelten Verfahrens zur Vergasung von hochkalorischen Abfällen aus chemisch-verfahrenstechnischer Sicht. Ziel des Verfahrens ist die Gewinnung von elektrischer Energie durch den Einsatz des produzierten Gases in turbogeladenen Gas-Motoren oder auch zur Erzeugung von Wärme.

Weiterhin werden die Ergebnisse der Versuchsreihen an der Pilot-Vorserien-Anlage (Maßstab 1:1) am Standort Schöngleina, Thüringen/Deutschland zwischen 1998 und 2011 bewertet.

Eine anlagen- und apparatespezifische Bewertung des Duplex-Turbulent-Expansive-Carbonbed-Process (Duplex-TEC-Process®) genannten Verfahrens erfolgt nicht.

2. Verwendete Unterlagen

Folgende Unterlagen wurden von der TCP Energies GmbH & Co. KG für die Erstellung der Verfahrensbewertung im Zeitraum zwischen dem 12.07.2021 und dem 23.07.2021 dem TÜV Thüringen e.V. zur Verfügung gestellt.

- Dokument „Grundlagen zur Vergasung – Mehrstufige Abfallvergasung mittels Duplex TEC-Process, Streitenberger 2020“ der TCP Energies GmbH & Co. KG
- Dokumentation der Pilot-Vorserien-Anlage nach dem Duplex-TEC-Process® in Betrieb zwischen 1998 und 2011 Standort: Schöngleina, Thüringen/Deutschland“ der TCP Energies GmbH & Co.KG
- Prinzipdarstellung der Eintrags- und Austragssituation im thermischen Bereich, Stand: 07.2021
- PDF-Datei „Ergänzungen im Rahmen der Mitwirkungspflicht 21.04.pdf“ mit folgenden Angaben:
 - Nachweis der 98% Kohlenstoffumsetzung nach dem Duplex TEC-Process®
 - exakte Reaktionsgleichungen mit Randbedingungen (Temperatur, Druck und weitere)
 - die Berechnung des Wirkungsgrades
 - Benennung der installierten Messtechnik im Reaktor und Vergaser
 - weitere relevante prozesstechnische Daten und Randbedingungen
 - Berechnungen zur Stoff-, Energie- und Massebilanz nach dem Duplex TEC-Process® Verfahren – Bilanzierung für eine TCP WGL 1-30, Stand 30.03.2018 Variante 57/43 der TCP Energies GmbH & Co. KG

3. Stand der Technik

Begriffsbestimmungen:

Das zu bewertende Verfahren zur Vergasung von hochkalorischen Abfällen wird vom Entwickler, der TCP Energies GmbH & Co. KG, als Duplex-TEC-Process® bezeichnet.

Unter Vergasung versteht man die thermische Umwandlung von kohlenstoffhaltigen Stoffen in ein Produktgas, das hauptsächlich aus Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Methan und leichten Kohlenwasserstoffen besteht. Weitere Bestandteile sind Kohlendioxid, Wasser und Stickstoff in Abhängigkeit vom angewendeten Verfahren.

Das „Cracken“, (von engl.: crack = spalten, zerplatzen, aufbrechen) beschreibt einen in der Petrochemie üblichen Prozess, bei dem unter Anwendung von Hitze, Druck u. Katalysatoren Kohlenwasserstoffe längerer Kettenlänge in Kohlenwasserstoffe kürzerer Kettenlänge gespalten werden.

In der vorliegenden Verfahrensbewertung werden die Begrifflichkeiten Pyrolyse und Thermolyse wie folgt angewendet:

Pyrolyse: thermische Umsetzung von Inputstoffen **ohne** Verwendung von Vergasungsmittel;

Thermolyse: thermische Umsetzung von Inputstoffen **mit** Verwendung von Vergasungsmittel.

Verfahren:

Pyrolyse von festen Stoffen:

Die *Pyrolyse* ist ein Prozess der thermischen Spaltung von chemischen Verbindungen, wobei durch Temperatur ein Bindungsbruch innerhalb von großen Molekülen erzwungen wird. Meist geschieht dies unter Ausschluss von Sauerstoff, um im Gegensatz zur Vergasung eine Verbrennung zu verhindern.

Die *Pyrolyse* erfolgt in der Regel bei Temperaturen ab ca. 350°C, wobei dann bei organischen Abfällen die vorhandenen Kohlenwasserstoffketten in kürzere Kettenmoleküle gecrackt werden.

In der *Pyrolyse* können Koks, Öl und Gas gewonnen werden. Bei niederen Temperaturen ergibt sich ein höherer Ölanteil, bei hohen Pyrolysetemperaturen steigt der Gasanteil.

Die *Pyrolyse* verläuft endotherm. Aufgrund der fehlenden Verbrennung muss ihr die für den Prozess erforderliche Wärme von außen zugeführt werden. [1]

Vergasung von festen Stoffen:

Das Grundprinzip der *Vergasung* ist die unvollständige Verbrennung des eingesetzten Brennstoffes. Diese findet üblicherweise bei Temperaturen ab $> 500^{\circ}\text{C}$ statt. Die heutigen Vergaseranlagen arbeiten in der Regel mit Temperaturen zwischen $850 - 1.200^{\circ}\text{C}$, wobei auch Prozesse bis über 2.000°C bekannt sind.

Die unvollständige Verbrennung entsteht durch eine Unterversorgung des Verbrennungsprozesses mit Sauerstoff.

Die Kohlenwasserstoffverbindungen werden vollständig gebrochen und durch Anlagerung von Sauerstoff im Idealfall zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff gespalten.

Der Vergasungsprozess ist prinzipiell exotherm, es wird Wärmeenergie freigesetzt.

Die energetischen Wirkungsgrade liegen bei der *Vergasung* je nach Vergasertyp und Prozessführung bei $80 - 95\%$. [1]

Anlagentechnik:

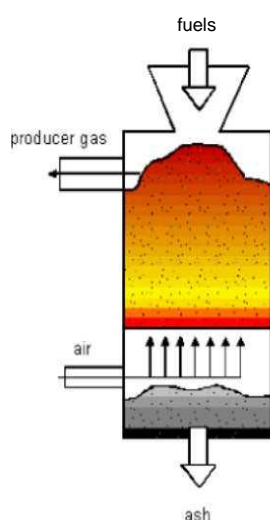
Die thermochemische Umwandlung von festen Brennstoffen in ein Brenngas findet im Vergasungsreaktor (Vergaser) statt. In kleinen Anlagen werden hauptsächlich Aufstrom- und Fallstromvergaser eingesetzt. Die Reihenfolge der Umwandlungsschritte von festen Brennstoffen, wie das Trocknen, die Pyrolyse, die partielle Oxidation und die Reduktion, hängt von der Art des Vergasers ab.

Der Brennstoff bestimmt mit seinen chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionskinetischen Eigenschaften die Auswahl des für den jeweiligen Prozess geeigneten Apparates. Weiterhin ist die Leistungsgröße ein entscheidender Parameter.

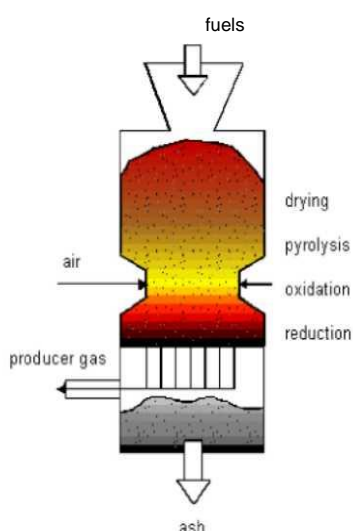
Bei der konstruktiven Lösung müssen spezifische Prozessparameter wie z.B. Druck und Temperatur berücksichtigt werden. In der Regel werden für die Vergasung von festen Brennstoffen

Schacht- und Wirbelschichtapparate und Kombinationen aus diesen zur dezentralen Energieversorgung eingesetzt [2].

Aufstromvergaser



Fallstromvergaser



Doppelfeuergaserzeuger

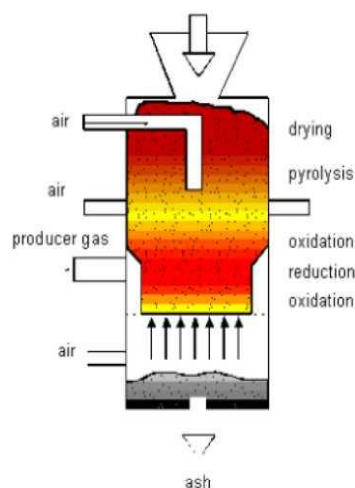


Abbildung 1: Vergaservarianten

Konzepte, bei denen verschiedene Bereiche voneinander physisch getrennt sind, vor allem die Pyrolyse von der Oxidation wurden vor allem in den letzten Jahren entwickelt und umgesetzt. Die Optimierung der einzelnen Schritte und die Minimierung der Teerproduktion sind die Hauptgründe für diese Trennung [3].

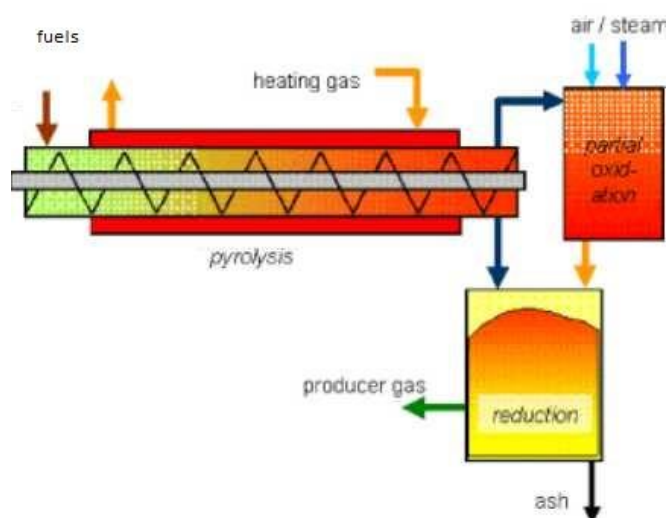


Abbildung 2: Zweistufiger Vergaser

4. Chemische Reaktionen

Charakteristisch für die chemischen Vorgänge bei der Vergasung ist der Sauerstoffmangel ($\lambda < 1$), im Gegensatz zur Verbrennung mit Sauerstoffüberschuss ($\lambda > 1$). Die Überführung des gebundenen Kohlen- und Wasserstoffes zu den Hauptrohgas Komponenten CO , CO_2 , H_2 , H_2O und CH_4 erfolgt über mehrere chemischer Reaktionen. Es laufen hier heterogene Reaktionen des Vergasungsmittels bzw. des Produktgases mit dem Feststoff (R2, R3, R5, R6, R8), homogene Reaktionen der Reaktionsprodukte untereinander bzw. mit dem Vergasungsmittel in der Gasphase (R1, R4, R7, R9) und Pyrolysereaktionen des Feststoffes (R10, R11) ab.

Reaktionsgleichung	ΔH_{298} [kJ/mol]	Bezeichnung	
$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$	-242	Verbrennung	R1
$\text{C} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$	-406	Verbrennung	R2
$\text{C} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}$	-123	Teilverbrennung (unvollst.)	R3
$\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{CO}_2$	-283	Teilverbrennung	R4
$\text{C} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO}$	+160	Boudouard-Reaktion	R5
$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$	+119	heterog. Wassergasreaktion	R6
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2$	-42	homog. Wassergasreaktion	R7
$\text{C} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4$	-87	hydrierende Vergasung	R8
$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-205	Methanisierung	R9
$\text{CH}_x\text{O}_y \rightleftharpoons (1-y)\text{C} + y\text{CO} + x/2\text{H}_2$		Pyrolyse	R10
$\text{CH}_x\text{O}_y \rightleftharpoons (1-y-x/8)\text{C} + y\text{CO} + x/4\text{H}_2 + x/8\text{CH}_4$		Pyrolyse	R11

Tabelle 1: Reaktionsgleichungen der Kohlenstoffvergasung [4/5]

Die Angaben in Tabelle 1 zeigen deutlich, dass die Produktgaszusammensetzung von dem **Vergasungsmittel und der Prozessführung** abhängt. So wird CO_2 als Vergasungsmittel für die Bildung von CO (R5) eingesetzt, wogegen Wasserdampf bei der Erzeugung von Wassergas (R6) verwendet wird. Da beide Reaktionen endotherm verlaufen, ist eine Energiezufuhr erforderlich. Das kann von außen als allotherme Vergasung oder auch durch Teilverbrennung (R3) im Reaktor selbst als autotherme Vergasung erfolgen [5].

5. Verfahrenstechnik

Da die Vergasung ein Prozess ist, bei dem der Feststoff in einem thermochemischen Prozess in ein Brenngas umgesetzt wird, ist die Zugabe eines Reaktionsgases zwingend erforderlich. Abhängig von der Zielvorgabe an den Prozess und das Produktgas hinsichtlich der Qualität werden als Reaktionsgas Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid bzw. Gemische aus den genannten Komponenten eingesetzt.

Bei der Erzeugung von Strom und Wärme wird aus wirtschaftlichen Gründen in den meisten Fällen Luft als Vergasungsmittel eingesetzt. Es sind auch Verfahren bzw. Anlagen bekannt, bei denen Wasserdampf eingesetzt wird. Der Einsatz von Luft oder sauerstoffhaltigen Vergasungsmitteln hat den Vorteil, dass der Prozess autotherm abläuft, da für die endothermen Vergasungsreaktionen benötigten Temperaturen durch die exothermen Oxidationsreaktionen direkt aus dem Prozess bereit gestellt werden.

Die Teilschritte des Reaktionsablaufs bei der Vergasung von festen Brennstoffen können in Trocknung, Entgasung, Reduktion und Vergasung/Verbrennung unterteilt werden. Werden mehrere Zielstellungen in nur einem Reaktionsraum angestrebt, sind die einzelnen Zonen, in denen die Teilschritte ablaufen, ungenügend voneinander getrennt. Das hat zur Folge, dass eine Optimierung im Hinblick auf den Umsatz des Feststoffes und die Einstellung der Gasqualität durch die Prozessführung schwierig sind, da sich Ziel- und Einflussgrößen oft überlagern und damit hemmen.

Die Möglichkeiten einer gezielten Beeinflussung des Prozesses über die Steuerung der wichtigsten Einflussgrößen werden mit der Beschreibung und Analyse der verfahrenstechnischen Grundlagen des Gaserzeugungsprozesses dargestellt.

Als relevante Einflussgrößen werden angeführt:

- Eigenschaften des Einsatzstoffes
- Sauerstoffangebot
- Verweilzeit
- Temperatur
- Druck
- Zusatzstoffe
- geforderte Qualität des Produkts (Brenngas)

[2].

In Abhängigkeit von den Eigenschaften der umzusetzenden Feststoffe und des eingesetzten Verfahrens und Apparates muss eine entsprechende Konditionierung vor dem thermischen Umwandlungsverfahren erfolgen.

Negativ auf die Effizienz der thermischen Verfahren wirkt sich vor allem ein hoher Wassergehalt der Feststoffe aus. Als optimale Inputwassergehalte für die Festen Brennstoffe werden für die Vergasung Werte zwischen 10 % und 15 % angegeben [2].

Weitestgehend wird die vorgeschaltete Pyrolyse in seit mehr als 50 Jahren wohlbekannten Drehrohröfen realisiert, in denen durch die Drehbewegung eine Durchmischung stattfindet.

Wie unter Punkt 3 bereits erwähnt, wurden Anlagenkonzepte, bei denen die verschiedenen Stufen der Umsetzung fester Brennstoffe in verwertbares Brenngas, wie das Trocknen, die Pyrolyse/Thermolyse weiterentwickelt und dokumentieren den derzeitigen Stand der Technik.

Apparatetechnisch stellt eine Anlage mit vorgeschalteter Stufe für die Trocknung der Brennstoffe, gefolgt von einer Thermolyse und einer nachfolgend gestuften Vergasung mit räumlich getrennten partieller Oxidation und Reduktion einen neuen Stand der Technik dar.

Ein großer Vorteil einer vor dem Vergaser angeordneten Thermolyse ist, dass die Brennstoffe nicht in Kontakt mit den Verbrennungsgasen während der Thermolyse stehen. [6]

6. Bewertung des Verfahrens

6.1 Beschreibung des Verfahrens

Verfahrens- und anlagentechnisch betrachtet, stellt der Duplex-TEC-Process® (Duplex-Turbulent-Expansive-Carbonbed-Process) eine mehrstufige geschlossene thermische Abfallbehandlung für hochkalorische kohlenstoffhaltige Abfälle zur Produktgaserzeugung mit anschließender Strom- und Wärmeerzeugung dar.

Die Anlage besteht aus der Trocknung, der Entgasung / Verschwelung (in diesem Prozess als Thermolyse bezeichnet) und der Vergasung. Die drei Prozesse sind u.a. strömungs- und wärmetechnisch gekoppelt, aber nicht nur räumlich, sondern auch apparativ getrennt.

Bewertet werden an dieser Stelle die Vor- und die Hauptvergasung.

Im Trockner wird das aufbereitete Rohmaterial auf eine prozesstechnische Restfeuchte von ca. 10 - 15% Wasser vorgetrocknet und dem Vorvergaser automatisch und kontinuierlich zugeführt. Im Vorvergaser wird, unter Zugabe von rekuperativ vorgewärmter und mit Sauerstoff angereicherter Luft, der Inputstoff auf mittlere Temperaturen von ca. 350 - 500°C aufgeheizt. Unter gesteuerten Betriebsbedingungen wie Druck, Temperatur, Vergasungsmittelzuführung sowie Aufheiz- und Verweilzeit in den verschiedenen Temperaturzonen des Reaktors, erfolgt eine Umsetzung zu Kohlenstoff-Koks, Teer/Öl und Schwelgas. Dabei wird die Restfeuchte verdampft, die organischen Verbindungen werden zu Schwelgas und Kohlenstoff umgesetzt.

Der Kohlenstoff-Koks gelangt danach, ohne Unterbrechung und räumliche Trennung, als Stoff-/Gasgemisch mit Schwelgasen, Wasserdampf und verschiedenen Gasanteilen, direkt in einen speziellen Mehrstufen-Vergaser im aufsteigend geführten Gleichstrom-/Flugstromverfahren.

In der ersten Stufe im unteren Vergaserteil, der Kohlenstoffwanne (Bereich des unteren Hauptvergaserteils, in den seitlich das Kohlenstoffgemisch (Feststoffanteil) aus dem Vorvergaser in den Hauptvergaser eingetragen wird) mit partiellem Lochboden und zentriert bewegten Mischwerkzeugen, wird der eingetragene Kohlenstoff-Koks mit einem vorgespannten heißen Vergasungsmittel durchströmt. Mittels der im Kohlenstoff-Koks-Bett platzierten Mischwerkzeuge kommt es zu einem Aufgasen, Mischen und Rühren und dadurch umfassenden Umhüllung (wrapping) der Kohlenstoffpartikel. Unter Zuführung des Vergasungsmittel und den einhergehenden

reaktiven Gasverbindungen (Hot Spots) kommt es zu einem quasi fluidisierten und schwebenden turbulent-expansiven Kohlenstoffbett (turbulent-expansive-carbon bed) mit voluminöser Ausdehnung (Aufschwimmen) desselben.

Durch die zeitgleiche Zuführung der Schwelgase aus dem Vorprozess direkt in das bewegte Kohlenstoffbett, kommt es bei Temperaturen von $\geq 800^{\circ}\text{C}$ zu einhergehenden Oxidations-Reduktions-Reaktionen und damit zum thermochemischen Aufbrechen der molekularen Kohlenstoffverbindungen in gasförmige Bestandteile.

In verfahrenstechnischen Beurteilung kann daher von einer nahezu vollständigen Vergasung der verfügbaren Kohlenstoffpartikel ausgegangen werden.

In der zweiten Stufe, im Oxidations-Reduktions-Raum oberhalb des fluidisierten Kohlenstoff-Koks-Betts, erfolgt bei Temperaturen von ca. 1200°C bis 1300°C eine weitere thermochemische Umsetzung der im Flugstrom nach oben mitgerissenen Kohlenstoffpartikel.

In der dritten Stufe strömt das Gas-Restkohlenstoff-Gemisch über partielle Strömungskanäle turbulent in den überdimensionierten (im Vergleich zum Oxidations-Reduktions-Raum in der zweiten Stufe) Nachreduktionsraum weiter.

Bei ausreichender Verweilzeit kommt es zur vollständigen Umwandlung der Rest-Kohlenstaub-Anteile zu einem brennbaren teerfreien Prozess-/Brenngas.

Das so entstandene Prozess-/Brenngas, im Wesentlichen bestehend aus CO , H_2 , CH_4 , CO_2 und minimalen Reststäuben, wird im oberen Teil des Vergasers abgezogen und einem mehrstufigen Reinigungs- und Abkühlungsprozess unterzogen. Das geschieht in einem speziellen Wärmetauscher-Zyklon, einem nachfolgenden Wärmetauscher, einem Heißgasfilter und einer Gasquench zur schnellen Abkühlung des Heißgases.

6.2 Chemische Reaktionen

Das Verfahren des Duplex-TEC-Process® beruht laut vorliegender Verfahrensbeschreibung auf folgenden chemischen Reaktionen:

Reaktionsgleichung	Bezeichnung	Reaktion lt. Pkt.3
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Oxidation	R2
$C + CO_2 \rightarrow 2 CO$	Boudouardreaktion	R5
$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	Wassergasreaktion	R6
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	Methanbildung	R8
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3 H_2$	Methanreformierung	
$CH_nO_o \rightarrow \frac{2}{3}CO + \frac{1}{3}CH_4 + (o - \frac{2}{3})H_2O + (\frac{n}{2} - o)H_2$	thermische Teerzersetzung – hypothetische Umsatzformel	--
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	Kohlenmonoxidoxidation	R4
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	Wasserstoffoxidation	R1
$CH_4 + \frac{3}{2}O_2 \rightarrow CO + 2 H_2O$	Methanteiloxidation	--
$CH_nO_o + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO + oH_2O + (\frac{1}{2} - o)H_2$	Teerteiloxidation	--
$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	homog. Wassergasreaktion	R7

Tabelle 2: Reaktionsgleichungen der Kohlenstoffvergasung, auf denen das Verfahren des Duplex-TEC-Process® beruht

Die chemischen Reaktionen stimmen weitestgehend mit den in der Literatur beschriebenen Reaktionsgleichungen der Kohlenstoffvergasung überein [4/5/8]. Die für den Ablauf der Reaktionen erforderlichen Temperaturbereiche sind in den beschriebenen Reaktoren vorhanden.

Es kann jedoch nicht belegt werden, dass alle Reaktionen exakt so in den beiden Reaktoren und Vergasungsstufen ablaufen. Zur Diskussion stehen dabei die Methanreformierung und die thermische Teerzersetzung bzw. Teerteiloxidation.

Bei der herkömmlichen Methanreformierung (Dampfmethanreformierung oder SMR: $CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2$) wird einem Reformer das Methan bei einer Temperatur von 800 bis 900°C und einem Druck von etwa 25-30 bar an einem Nickelkatalysator mit Wasser zu Kohlenstoffmonoxid. Unter atmosphärischen Bedingungen besitzt die Methanreformierung nur beim Vorhandensein

katallytisch wirksamer Feststoffe, zu denen auch Bettasche oder Bettmaterial zählen können, nennenswerte Bedeutung.

Jedoch wurde bereits 2002 ein Verfahren beschrieben, bei dem ein wasserstoffreiches (44%) Synthesegas mit sehr geringem Methananteil (1%) durch sogenannte „gestufte Reformierung“ erzeugt wurde [7]. Bei der gestuften Reformierung sind Pyrolyse und Vergasung technisch voneinander getrennt.

Ausgehend von den Analysen des Brenngases in der Dokumentation „TCP WGL - Dokumentation der ersten Brenngas-Anlage in Betrieb zwischen 1998 und 2011“, die in den Kampagnen 14-15 und 28-29 einen Anteil von höheren Kohlenwasserstoffen < 0,1% aufweisen, ist davon auszugehen, dass die im Vorvergaser entstandenen Teeranteile im mehrstufigen Hauptvergaser umgesetzt werden.

6.3 Verfahrenstechnik

Die Thermolyse findet im Vorvergaser statt, einem geschlossenen, stationären Reaktor mit autothermer Prozessführung mit Vergasungsmittel und innenliegenden Fördereinrichtungen, die vor allem dem Transport des Brennstoffes und weniger der Durchmischung desselben dienen, da das Glutbett im Reaktor erhalten bleiben soll.

Dieser Reaktor unterscheidet sich deutlich von der bekannten (Drehrohr-)Pyrolyse / Thermolyse, die in hermetisch abgedichteten, indirekt beheizten Drehrohröfen abläuft [9].

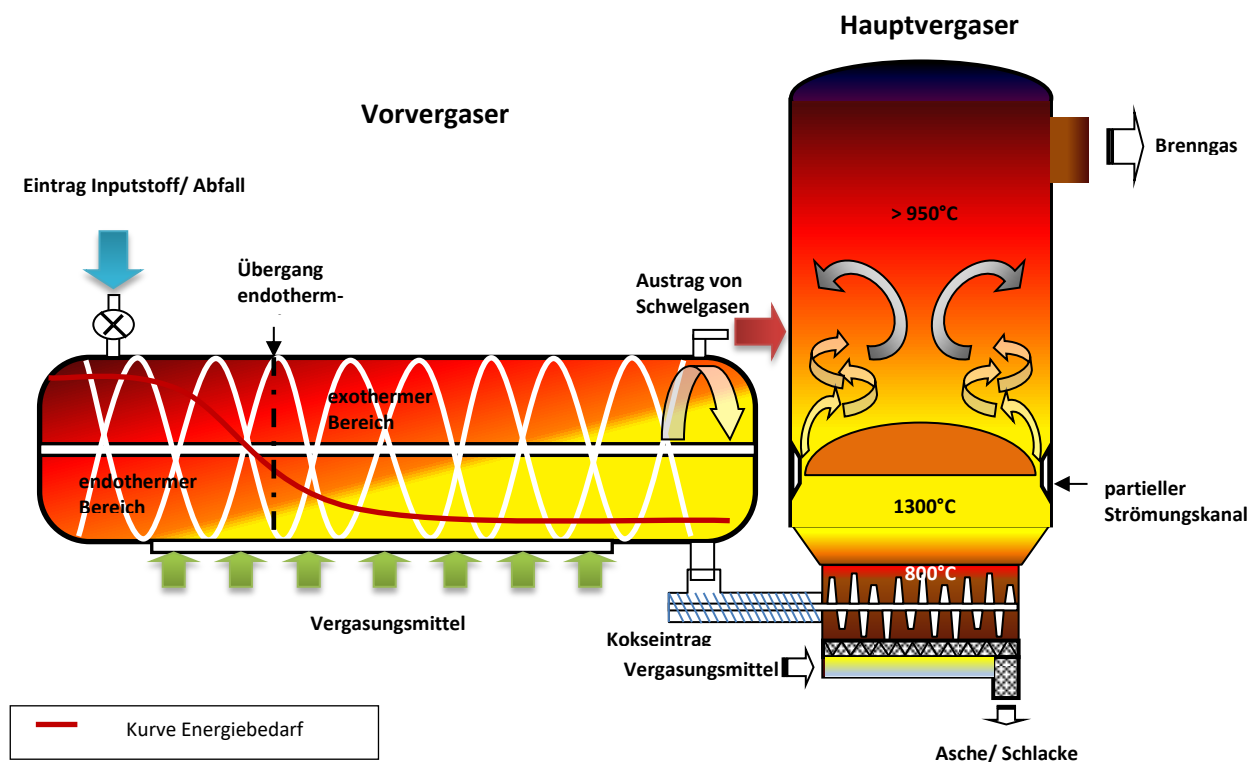


Abbildung 3: Schematische Darstellung Vorvergaser und Hauptvergaser des Duplex TEC Process

Der Duplex TEC-Mehrstufenvergaser (Turbulent Expansive Carbonbed) wird auch als Hauptvergaser bezeichnet. Hierbei handelt es sich um eine Zusammenführung aus Gleichstromvergaser mit Flugstromvergaser, aufsteigend. Über adaptive Vergasungsstufen (spezielle strömungstechnische Einbauten) und einem fluidisiert-schwebenden turbulent-expansive Kohlenstoffbett erfolgt die gastechnische Umwandlung. Diese mehrstufige Ausführung kombiniert

die Vorteile eines Festbettvergaser mit aufsteigender Vergasung, eines Wirbelschichtvergaser mit stationärem Festbett und eines Flugstromvergaser.

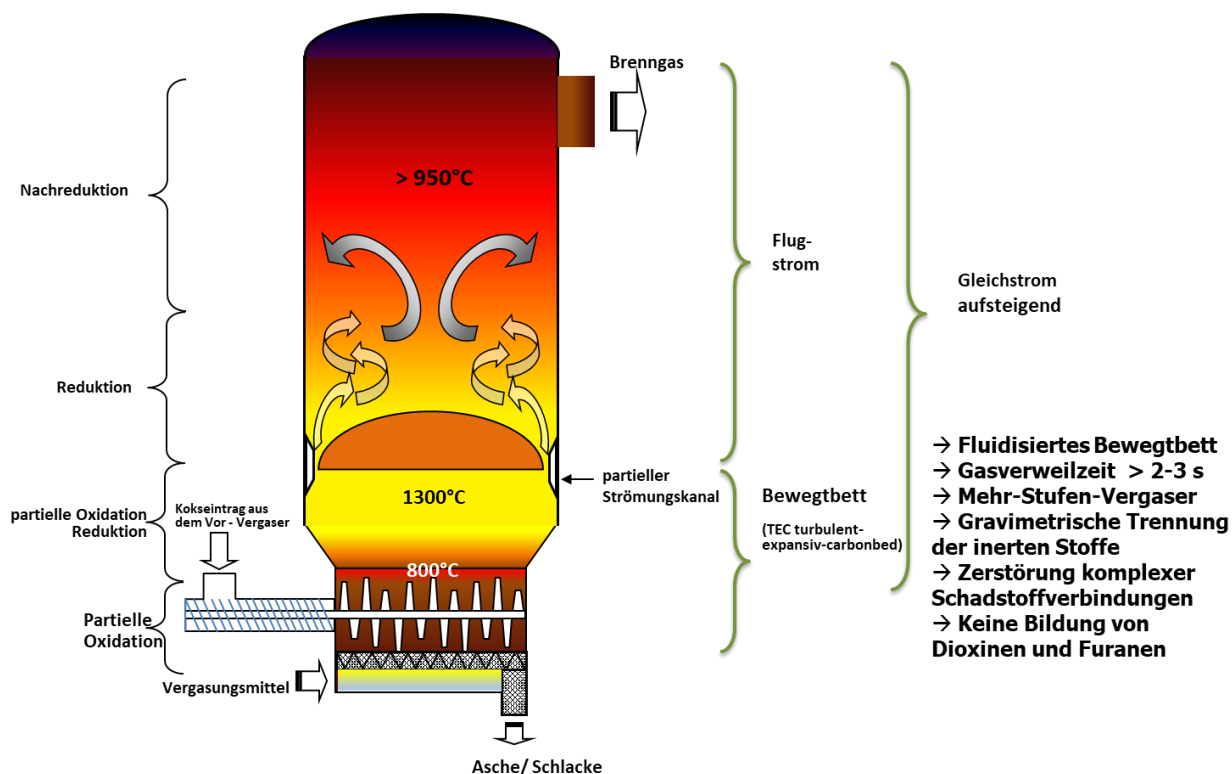


Abbildung 4: Hauptvergaser (Duplex-TEC-Mehrstufen-Vergaser)

In diesem Hauptvergaser kommt es durch den genau dosierten Volumenstrom an Vergasungsmittel (Luft - Sauerstoffgemisch mit einem O₂-Anteil > 50%) zu einer Fluidisierung des Festbettes (Bewegt-Bett) in der ersten Stufe und somit zu einer räumlich begrenzten stationären Wirbelschicht mit reaktiven thermochemischen Umwandlungen des Kohlenstoffs zu einem heizwertreichen Rohgas. Durch die Durchmischung des Kohlenstoffbettes mit der Vergasungsmittelzufuhr über einen Lochboden und der Zerstörung der Kapillarbildung durch ein Rührwerkzeug kann ein nahezu vollständiger Kohlenstoffumsatz erreicht werden.

In einer glockenförmigen Trennwand zum Nachreduktionsraum oberhalb des fluidisierten Kohlenstoffbettes befindet sich der sogenannte Oxidations-Reduktions-Raum, der die freigesetzten Gase und Stäube mit konstanter Strahlungswärme mit einer Temperatur von ca. 1200°C -1300°C

beaufschlagt. In dieser Zone werden durch die Stoffflussrichtung von unten nach oben festbettfreie Redoxreaktionen ausgelöst werden.

Der Stofftransport in den darüber liegenden Nachreduktionsraum wird über einen Ringspalt zwischen Trennwand und Reaktorwand realisiert.

Durch diesen Nachreduktionsraum ($>950^{\circ}\text{C}$) über der glockenförmigen Trennwand mit spezifischer Gasführung und ausreichend verfügbaren freien Vergaserraum (Flugstrom) wird der Vergasungsvorgang insoweit verstärkt werden, dass die langkettigen organischen Verbindungen dabei weitestgehend zerstört und in niedermolekulare Bestandteile zerlegt werden. Durch das vorhandene Volumen des freien Vergaserraumes soll eine Verweilzeit von $> 2\text{-}3\text{ s}$ erreicht und in dieser Zeit die noch vorhandenen Teeranteile fast vollständig umgesetzt werden. Dementsprechend gering ist der zu erwartende Feststoffaustrag.

Die gesamte Anlage wird im Unterdruckbereich betrieben. Dieser Umstand minimiert die Maßnahmen des Explosionsschutzes.

Zur Prozesssteuerung und -überwachung werden im Vorvergaser und im Hauptvergaser O_2 -Sonden zur Messung der Sauerstoff-Konzentration, Thermoelemente für die Temperaturüberwachung sowie Drucksensoren zur Überwachung des Druckregimes installiert.

Für die Kontrolle des fluidisierten Festbetts im Hauptvergaser ist zudem eine radiometrische Messung vorgesehen.

Die Produktgasqualität wird nach der Gasquench durch ein Gasanalysesystem überwacht.

Die vorgelegte Stoffstromanalyse, die Stoff-, Energie- und Massenbilanz, die Berechnung des Wirkungsgrades und die Prozessmodellierung sind weitgehend nachvollziehbar.

7. Zusammenfassung

Durch die Trennung der drei Behandlungsstufen Trocknung, Entgasung / Verschwelung, in diesem Prozess als Vorvergasung (Thermolyse) bezeichnet, und Hauptvergasung können die jeweils optimalen und erforderlichen Prozessbedingungen eingestellt werden.

Damit ist eine entscheidende Voraussetzung dafür geschaffen, dass der Energiegehalt der eingesetzten hochkalorischen Input- und Abfallstoffe durch die Herstellung eines zur thermischen und/oder elektrischen Verwertung geeigneten Vergasungsgases (Brenngas) in hohem Maße genutzt wird.

In Verbindung mit der Nachnutzung der abgegebenen Prozesswärme und der Wärme, die bei der Erzeugung elektrischer Energie mittels Gasmotoren entsteht, kann das Verfahren eine weitere noch höhere Effizienz erreichen. Dies kann durch den Einsatz von ORC-Anlagen zur weiteren Stromerzeugung noch gesteigert werden.

Das bewertete Verfahren stellt durch die gestufte autotherme Vergasung mittels Bewegtbett im Gleichstromverfahren (aufsteigend) und hinreichend großem Nachreduktionsraum eine Neuentwicklung dar, die damit dem Stand der Technik entspricht.

Mit den umfangreichen und dokumentierten Forschungen an der Pilot-Vorserien-Anlage im industriellen Maßstab im Zeitraum von 2000 bis 2011 konnten die Grundlagen für eine Prozessmodellierung geschaffen werden. Die gewonnenen Erfahrungen können beim Bau von industriellen Anlagen direkt umgesetzt werden, da sich die eigentliche Anlagengröße nicht ändert, sondern größere Anlagen modular durch den Einsatz mehrerer parallel betriebener Anlagenmodule (**Waste Gasification Lines - WGL[®]**) realisiert werden sollen. Damit sind Fehler in der Maßstabsübertragung (scale up) ausgeschlossen.

Auf Grundlage der uns übergebenen Dokumente und der Literaturrecherche kann eingeschätzt werden, dass der von der TCP Energies GmbH & Co. KG Jena entwickelte Duplex-TEC-Process[®] zur Vergasung von hochkalorischen Inputstoffen/Abfällen aus chemisch-verfahrenstechnischer Sicht geeignet ist.

Wir versichern, dass wir die Verfahrensbewertung unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen erstellt haben.

Bewertung des "Duplex TEC-Process®" aus chemisch-verfahrenstechnischer Sicht

Die Verfahrensbewertung wird 2-fach erstellt. Der Auftraggeber erhält eine Ausfertigung, eine bleibt bei unseren Unterlagen.

A blue ink signature of Wulf Timaeus.

Dipl.-Ing. Wulf Timaeus
Abteilungsleiter Industrie Service

A blue ink signature of Jörg Hentrich.

Dipl.-Ing. (FH) Jörg Hentrich
Sachverständiger Dampf-/Drucktechnik

8. Quellenangaben

- [1] http://www.ikr-schalles.de/Die_Vergasung_organischer_Abfalle.pdf
- [2] Böhning, D.; Beckmann, M.: Vergasung und Verbrennung von Biomasse für den dezentralen Anwendungsbereich. In: Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe. 19. Fachtagung, 17.09. - 18.09.2013 in Dresden
- [3] Leitfaden für die sichere und umweltverträgliche Biomassevergasung, Deutsche Version, November 2009
- [4] <https://campus.tum.de/tumonline> - Prozesstechnik_Kapitel5.pdf
- [5] <http://diglib.uni-magdeburg.de/Dissertationen/2003/eycschotte.pdf>: Untersuchungen zur Vergasung und Verbrennung von Kohlen und Biomassen unter Anwendung der Gaspotentiometrie mit Sauerstoff-Festelektrolyt-Sonden
- [6] EP0522919 (A1) - Process and installation for the thermolysis of industrial and/or domestic waste (<http://worldwide.espacenet.com>)
- [7] Michael Mayer, Heinz-Jürgen Mühlen und Christoph Schmid 2002: Gestufte Reformierung biogener Reststoffe - Erste Betriebserfahrungen. Präsentation auf der DGMK Tagung "Velen V"
- [8] <https://www.yumpu.com/de/document/view/2740784/zur-vergasung-von-rest-otto-von-quericke-universität-magdeburg/91>: Zur Vergasung von Rest- und Abfallholz in Wirbelschichtreaktoren für dezentrale Energieversorgungsanlagen – Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.) von Dipl.-Ing. Helmar Tepper
- [9] <http://www.dgengineering.de/Drehrohr-Verfahren-Pyrolyse.html>