

Innovativer Oxyfuel-Kraftwerksprozess mit CO₂-Abscheidung für eine auch in Zukunft wettbewerbsfähige Stromerzeugung aus Braunkohle

P.G. Gilli, **S. Hellfritsch**, Technische Universität Dresden
N. Jentsch, Vattenfall Europe Generation, Cottbus

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird der Oxyfuel-Prozess für Braunkohle mit CO₂-Abscheidung am Beispiel eines möglichen Großkraftwerkskonzeptes vorgestellt. Durch eine konsequent optimierte Verschaltung mit umfangreicher Abwärmenutzung sowie weitere effizienzsteigernde Maßnahmen liegt der erzielbare Wirkungsgrad im Bereich heutiger moderner Braunkohlekraftwerke.

1. Der Oxyfuel-Prozess als Technologie für das CO₂-freie Kraftwerk

Neben der CO₂-Abtrennung aus dem Rauchgas von konventionellen Kraftwerken und der Kohlevergasung mit Abtrennung des CO₂ aus dem Brenngas nach dem sogenannten CO-shift ist das Oxyfuel-Verfahren eine der realistischen Möglichkeiten, ein sogenanntes CO₂-freies Kraftwerk zu bauen, also ein Kraftwerk, bei welchem das CO₂ abgetrennt wird und somit zu einer Deponierung gebracht werden kann.

Wesensmerkmal des Oxyfuel-Prozesses, der auch O₂/CO₂-Verbrennungsprozess genannt wird, ist die Verbrennung mit reinem Sauerstoff als Oxydationsmittel anstelle von Luft. Die konzentrierte Sauerstoffzugabe hat die Funktion der unmittelbaren Bildung von CO₂, und abhängig vom Kohlenstoffgehalt des Brennstoffs entsteht aufgrund des fehlenden Luftstickstoffs ein Rauchgas mit einer CO₂-Konzentration von bis zu 80 %. Zur Beherrschung der Verbrennungstemperaturen ist allerdings eine künstliche Erhöhung des Gasdurchsatzes in der Brennkammer als „Stickstoffersatz“ notwendig. Zweckmäßigerweise geschieht dies in Form von rezirkuliertem Rauchgas. Als Endprodukt des Verbrennungsvorganges entsteht ein CO₂/H₂O- Strom. Der als Nebenprodukt erzeugte Wasserdampf kann durch Kondensation abgetrennt werden. Ebenso können vom Abgasstrom, der nunmehr eine hohe CO₂-Konzentration aufweist, die verbleibenden Inertgase entfernt werden.

Bild 1 gibt einen Überblick über das grundsätzliche Verfahrensfliessbild für einen Oxyfuel-Prozess mit CO₂-Abscheidung und Brennstoff Braunkohle

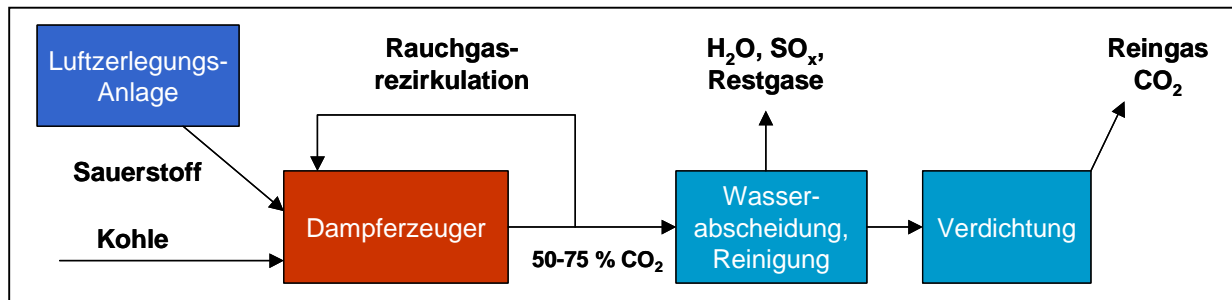


Bild 1: Schematische Darstellung des Oxyfuel-Prozesses

Erste Erwähnung fand der Oxyfuel-Prozess zu Beginn der 80er Jahre in der aufkeimenden Diskussion um CO₂ als Treibhausgas. Bereits damals sah man diese Technologie als eine besonders attraktive Möglichkeit zur Reduzierung der CO₂-Emissionen fossil befeuerter Kraftwerke an. Die Vorschläge gingen dahin, den als Rauchgas erzeugten CO₂-Strom noch etwas mehr zu reinigen und das Produktgas (nahezu 100 % CO₂) anschließend wirtschaftlich sinnvoll einer EOR-Nutzung zuzuführen (Enhanced Oil Recovery, Injektion von Inertgasen in Ölfelder und dadurch Erhöhung der Ölfördermenge). Nach der vollständigen Erschöpfung solcher für EOR genutzten Ölfelder könnten diese abgeschlossen werden und das eingeleitete CO₂ bliebe darin gespeichert. Denkbar sind jedoch auch andere Möglichkeiten der Klimaunwirksamen Speicherung von CO₂. Hierzu zählen Enhanced Coal Bed Methane Recovery (Austreiben von Methan aus Kohleflözen), eine Speicherung in Aquiferen (Tiefseespalten), alten Salzstöcken oder anderen geologischen Formationen.

2. Zur Rezirkulation

Beim Oxyfuel-Prozess wird mittels einer Luftzerlegungsanlage aus der Verbrennungsluft der Stickstoff extrahiert und nur der Sauerstoffstrom mit einer hohen Reinheit (95-99,6%) geht in den Verbrennungsprozess ein. Dies führt zu einem um ca. 75% kleineren Rauchgasmassenstrom, der Normvolumenstrom verringert sich auf etwa ein Sechstel des ursprünglichen Wertes. Durch Leckluft, Brennstoffstickstoff und vor allem durch einen hohen Wassergehalt im Brennstoff wird das Rauchgasvolumen häufig nur um den Faktor 3 vermindert.

Bei der Verbrennung nur mit Sauerstoff wird in der Brennkammer der bei konventionellen Anlagen mit eingetragene Stickstoff definitionsgemäß nicht eingetragen, das heißt es entsteht bei gleicher Wärmefreisetzung ein wesentlich geringerer Massenstrom bzw. Wärmekapazitätsstrom der Rauchgase, was das Rauchgastemperaturniveau (u.a. die adiabate Verbrennungstemperatur) wesentlich erhöht (**Bild 2**).

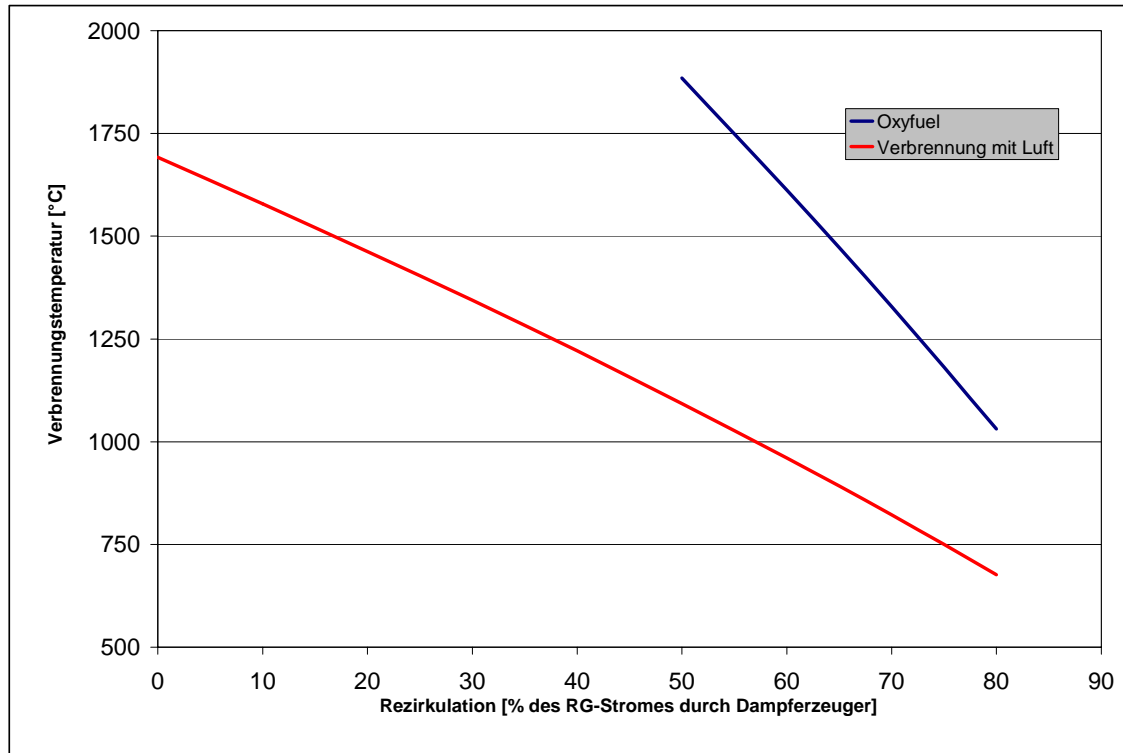


Bild 2: Adiabate Verbrennungstemperaturen in Abhängigkeit von der Rezirkulationsrate (TBK mit 12% Restfeuchte, Eintrittstemperatur Sauerstoff (95% Reinheit): 300 °C und Temperatur der rezirkulierenden Rauchgase: 350 °C)

Wesentlich erhöhte Temperaturen führen jedoch zu Verschlackungen in der Brennkammer und in den nachfolgenden Heizflächen des Dampferzeugers. Will man bei der konventionellen Feuerungstechnologie mit trockenem Ascheabzug verbleiben, so müssen die Temperaturen verringert werden, am besten durch Beimischung kälteren Rauchgases aus dem hinteren Teil des Dampferzeugers in die Brennkammer (Rauchgasrezirkulation), wobei die Größenordnung ca. 70 % der Gesamtrauchgasmenge beträgt. Von dieser Variante wird vorläufig ausgegangen. Eine Möglichkeit zur Elimination oder zumindest zur Verringerung der – mit Aufwendungen verbundenen – Rauchgasrezirkulation ist die Betriebsweise einer Wirbelschichtfeuerung oder einer Feuerung mit flüssiger Entaschung (Schmelzkammer/Aufschmelzen der Kesselasche). Darauf wird in der Folge noch eingegangen.

3. Das Konzept Vattenfall / TU Dresden für ein 920 MW Oxyfuel-Braunkohlekraftwerk

In Zusammenarbeit mit Vattenfall Europe Generation wurde am Lehrstuhl Kraftwerktechnik der TU Dresden ein entsprechendes Kraftwerkskonzept auf der Basis von Rohbraunkohle erarbeitet und erste Optimierungen durchgeführt.

Die Bruttoleistung ist 920 MW. Als Brennstoff im Kessel dient vorgetrocknete, mitteldeutsche Braunkohle (grubenfeucht: $H_u=11,7$ MJ/kg, $w=51$ %) und der erzeugte, gereinigte CO_2 -Strom soll an der Kraftwerksgrenze bei einem überkritischen Druck von 100 bar und Umgebungstemperatur zur Verfügung gestellt werden.

Durch sukzessive durchgeführte Verbesserungsmaßnahmen, insbesondere hinsichtlich der Abwärmenutzung, konnten alle Anlagenteile optimal in den Gesamtprozess integriert werden.

Prozessbeschreibung, Übersicht

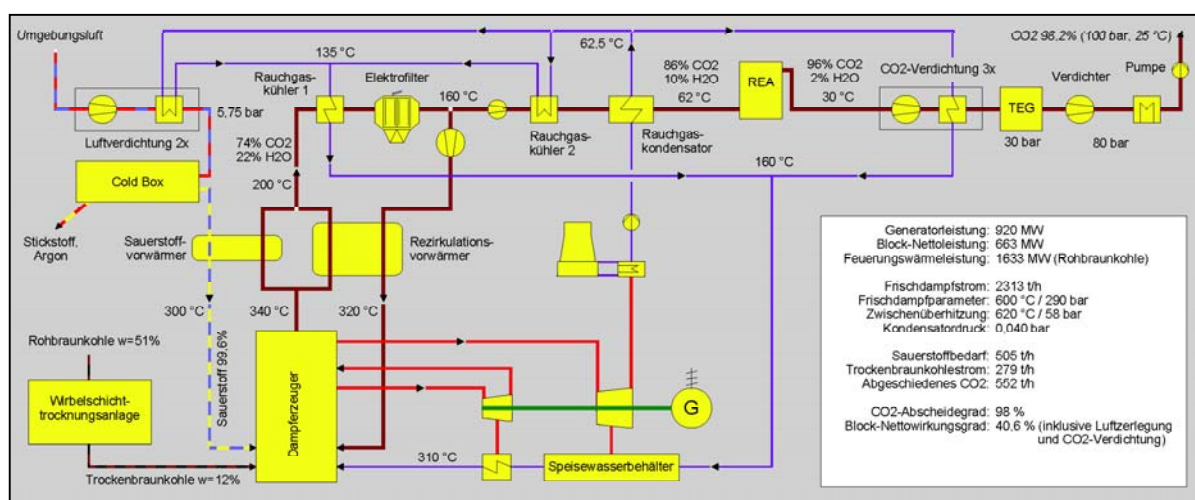


Bild 3: Grundschriftbild des optimierten Oxyfuel-Anlagenkonzeptes

Bild 3 enthält eine Übersicht über die Verschaltung und wichtigsten Parameter, nachfolgend werden die Hauptkomponenten der Anlage erläutert:

Die Anlage enthält eine Braunkohletrocknungsanlage, die bekanntlich den Prozesswirkungsgrad um einige Prozent (bis zu 5 %-Punkte) erhöht, und wie sie derzeit noch großtechnisch an der Schwelle zur industriellen Reife ist. In unserem Falle wurde eine atmosphärische Wirbelschichttrocknung mit Brüdenverdichtung modelliert, ähnlich wie sie bei RWE Power konzipiert und auch gebaut wurde.

Als Luftzerlegungsanlage wurde eine kryogene Luftzerlegungsanlage angenommen, wie sie Stand der Technik insbesondere für große O₂-Mengen ist, beispielsweise in Stahlwerken. Betrachtet man die derzeit größten gebauten Anlagenleistungen, so sind für den Sauerstoffbedarf des 920 MW-Blocks 3 solcher Anlagen parallel zu schalten. Die bei der Luftverdichtung anfallende Wärme (Kompressoren) kann im Prozess größtenteils genutzt werden.

Dampferzeuger

Auslegung und Design des Dampferzeugers gehören zu den wichtigsten Entwicklungsschwerpunkten für einen Oxyfuel-Braunkohleblock. Es wurde für die Studie ein Einzugsdampferzeuger mit Staubfeuerung angenommen, da dies der gängigen Lösung für Braunkohle entspricht. Für den Oxyfuel-Prozess müssen aber in jedem Fall einige maßgebliche Unterschiede gegenüber herkömmlichen Dampferzeugern beachtet werden.

Hier ist zunächst die erforderliche Gasdichtheit hervorzuheben, durch das Ansaugen von Falschluff und damit auch Stickstoff unterbunden werden soll. Dies trifft nicht nur für den Dampferzeuger selbst, sondern in gleichem Maße auch auf Bekohlung und Feuerung sowie den gesamten Rauchgasweg mit all seinen Prozessstufen zu. Ein anderes wichtiges Merkmal eines Oxyfuel-Dampferzeugers ist die bereits erwähnte Rauchgasrezirkulation. Sollen übliche adiabate Verbrennungstemperaturen von 1800 °C nicht überschritten werden, müssen etwa 75 % der Rauchgasmenge am Dampferzeugeraustritt rezirkuliert werden. Im Kessel selbst ersetzt das rezirkulierte Rauchgasvolumen lediglich den fehlenden Luftstickstoff, die Rauchgasmenge im Dampferzeuger bleibt also im wesentlichen gleich.

Hinsichtlich der Schaltung der Rezirkulation hat sich aus Gründen des Wirkungsgrades und der Verhinderung einer hohen Staubbelastung im Rezirkulationsgebläse eine Schaltung als vorteilhaft erwiesen, bei welcher die Rezirkulation nach dem Elektrofilter bei ca. 160 °C entnommen wird, jedoch vor der Einbringung in die Brennkammer in einem Rezirkulationsvorwärmer durch das Rauchgas – ähnlich wie bei einem Luftvorwärmer – wieder auf ca. 320 °C erhitzt wird (Variante „Rezirkulationsvorwärmung“ in **Bild 4**). Die ebenfalls gezeigte Variante mit heißer Rezirkulation hat den Nachteil eines zusätzlich benötigten Staubabscheidezyklons zum Schutz des Gebläses. Die Variante mit kalter Rezirkulation hat den Nachteil eines geringeren thermodynamischen Wirkungsgrades.

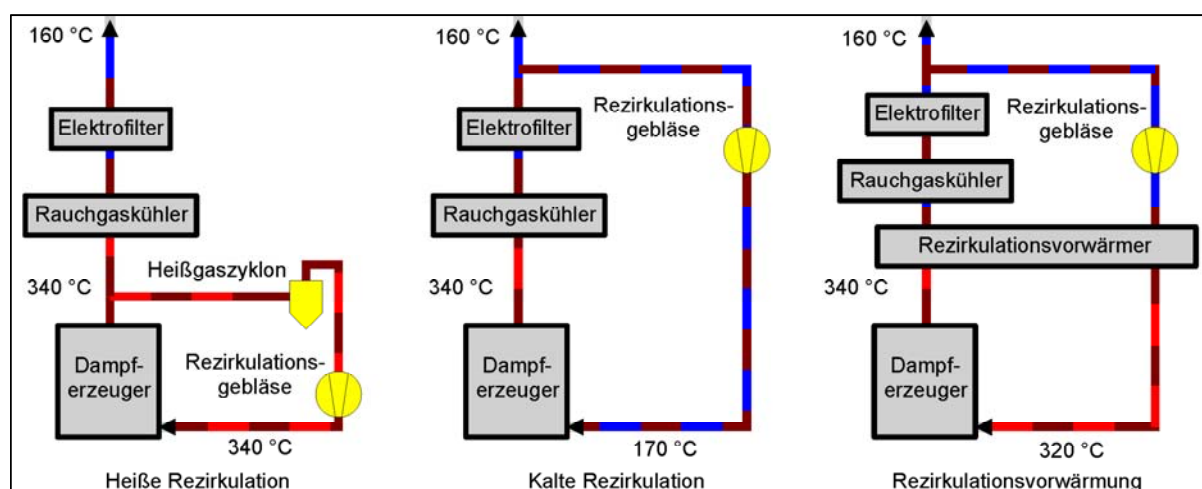


Bild 4: Vergleich von Varianten der Rauchgasrezirkulation

In ähnlicher Weise erweist es sich als vorteilhaft, den Sauerstoff vor Einbringung in die Brennkammer über das Rauchgas vorzuwärmen (O₂-Vorwärmer). In Summe erzielt man damit ähnliche Verhältnisse wie bei einem konventionellen Kessel und dessen Luftvorwärmerschaltung. **Bild 5** stellt die entsprechenden Wirkungsgrade dar.

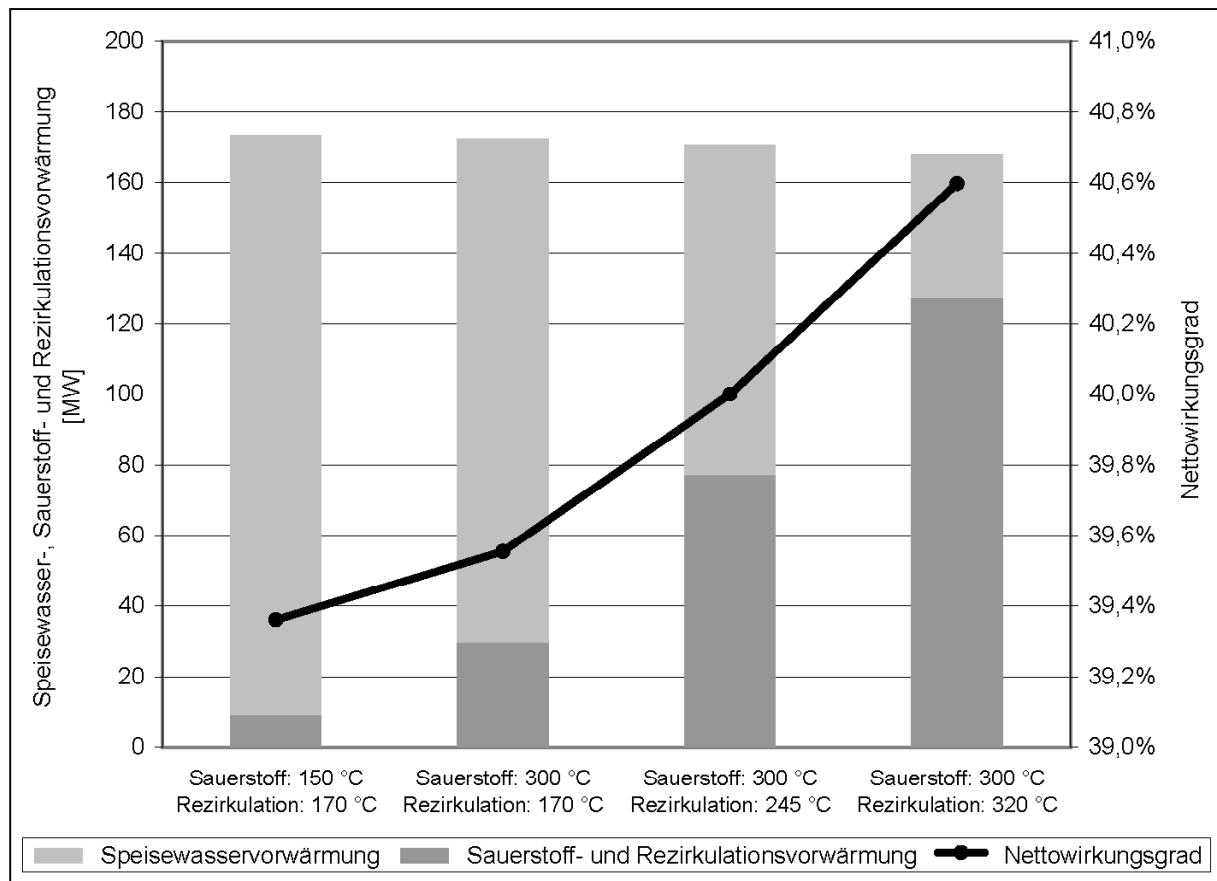


Bild 5: Vorwärmung von Sauerstoff und rezirkuliertem Rauchgas als Mittel zur Wirkungsgradsteigerung

Varianten des Dampferzeugers

Die oben genannten hohen Mengen an Rauchgasrezirkulation dienen beim Dampferzeuger mit Staubfeuerung und trockenem Ascheabzug insbesondere auch zur Vermeidung von Verschlackungen.

Ein Weg, um die Rezirkulation zu eliminieren oder zumindest wesentlich zu verringern, ist die zirkulierende Wirbelschichtfeuerung. Diese erlaubt es, relativ viele Heizflächen in der Brennkammer (Wing-Walls) bzw. im Primärkreislauf (Fließbettkühler) unterzubringen und somit dort ohne Temperaturerhöhung bei Verringerung der Rezirkulation mehr Wärme abzubauen. Nachdem die zirkulierende Wirbelschicht auch bei konventionellen – nicht CO₂-freien – Anlagen eine in größeren Kraftwerken eingesetzte Alternative ist (Frankreich, Polen,

USA, Kanada), besteht eine Chance, dass sie im Falle der O_2/CO_2 -Verbrennung gegenüber der Staubfeuerung insgesamt von Vorteil ist, zumal die maximale Leistung solcher Wirbelschichtanlagen in den letzten Jahren wesentlich gesteigert werden konnte.

Eine andere Möglichkeit zur Elimination oder zumindest zur Verringerung der Rauchgasrezirkulation ist die Schmelzkammerfeuerung. Die damit verbundene wesentlich höhere NO_x -Emission ist beim Oxyfuel-Prozess ein geringerer Nachteil als bei konventionellen Kraftwerken. Ebenso würde es erlauben, den Dampferzeuger – wegen der höheren wirksamen Temperaturdifferenzen - kleiner auszulegen, so dass diese für Steinkohle früher durchaus gängige Variante näher zu erwägen bzw. zu untersuchen ist (z.B. Untersuchung des zu erwartenden Anstiegs der Verschmutzung der Nachschaltheizflächen). In früheren Zeiten scheiterte unseres Wissens der Einsatz der Schmelzkammerführung bei Braunkohle an der niedrigen Feuerraumtemperatur bzw. musste zur Anhebung der Temperatur Trockenbraunkohle eingesetzt werden. Diese Nachteile entfallen jedoch beim Oxyfuel-Prozess.

Niedertemperatur-Rauchgas-Economizer und Rauchgaswasserkondensationsanlage

Die bei der Rauchgaskühlung und anschließenden Kondensation des enthaltenen Wasserdampfes frei werdende Abwärme wird von Rauchgaskühlern (oberhalb des Taupunktes) und einer Rauchgaswasserkondensationsanlage abgeführt und direkt zur Speisewasservorwärmung genutzt. Die Anlage besitzt zwei Rauchgaskühler, von denen der größere im Rauchgastemperaturbereich von etwa 200 °C bis 150 °C vor dem Elektrofilter und somit vor Abzweigung der Rezirkulation angeordnet ist. Ein kleinerer Kühler befindet sich im Rauchgasstrom nach Abzweigung der Rezirkulation und sorgt für eine weitere Abkühlung der Rauchgase bis auf etwa 80 °C.

Anschließend erfolgt der Eintritt in die Rauchgaswasserkondensationsanlage, welche säurefest zu gestalten und damit den bereits an einigen Braunkohleblöcken eingebauten Rauchgaswärmeverschiebestationen sehr ähnlich ist. Während dieses nassen Verfahrensschritts wird auch ein Großteil anderer Verunreinigungen abgeschieden, insbesondere Feinpartikel und SO_x .

Entschwefelungsanlage

Bei der Konzepterstellung des Oxyfuel-Braunkohleblockes mit CO_2 -Abscheidung wurde davon ausgegangen, dass unabhängig von der Art der Deponierung ein Verbleib schwefelhaltiger Komponenten im CO_2 nicht vertretbar ist. Die deshalb vorgesehene Entschwefelungsanlage ist nach der Rauchgaswasserkondensationsanlage angeordnet.

Die Entschwefelung kann auf herkömmliche Art durch Nasswäsche mit einer Kalksuspension erfolgen, wobei aufgrund des geringeren Rauchgasvolumenstroms und der höheren SO_x -Konzentration von einem besseren Entschwefelungsgrad sowie verringertem Bauaufwand, Investitionskosten und Eigenbedarf ausgegangen werden kann. Auch können andere Entschwefelungsverfahren zum Einsatz kommen, die möglicherweise beim Oxyfuel-Prozess mit CO_2 -Abscheidung Vorteile haben.

CO_2 -Verdichtung und Resttrocknung

Das CO_2 wird nach der Entschwefelung in drei Stufen auf 30 bar verdichtet und mittels eines Absorptionsmittels getrocknet (im allgemeinen ein Glykol, beispielsweise TEG [4]).

Nach der Trocknung erfolgt ein weiterer Verdichtungsschritt auf überkritische 80 bar, wo das CO_2 bei Abkühlung in einen quasi-flüssigen Zustand hoher Dichte übergeht. Gasförmige Verunreinigungen (Sauerstoff, Argon) bleiben darin gelöst und eine Hochdruckpumpe erzeugt den erforderlichen Transportdruck, im vorliegenden Fall von 100 bar.

Effiziente Abwärmenutzung zur Speisewasservorwärmung

Die regenerative Abwärmenutzung spielt beim Oxyfuel-Prozess eine entscheidende Rolle für die Erzielung eines akzeptablen Wirkungsgrades, da der elektrische Eigenbedarf gegenüber konventionellen Kraftwerksblöcken durch die Verdichter der Luftzerlegungsanlage und die CO_2 -Verdichter stark ansteigt. Als Ausgleich existieren einige zusätzliche Abwärmequellen, die bei entsprechender Auslegung für interne Zwecke genutzt werden können. Dies sind zum einen die Kühlung der genannten Verdichter, weiterhin werden aber auch große Wärmemengen aus der Abkühlung der Rauchgase und Rauchgaswasserkondensation frei. Letztere ist beim Oxyfuel-Prozess mit CO_2 -Abscheidung obligatorisch, da dies die einfachste Möglichkeit zur Entfernung des Wasserdampfanteils als größte Verunreinigung des CO_2 darstellt.

Zielstellung bei der wärmetechnischen Auslegung der regenerativen Abwärmenutzung war zunächst eine nahezu vollständige Nutzung aller Abwärmen für interne Zwecke mit möglichst geringem Verlust durch Abführung über den Kühlturm. In **Bild 6** ist die Verschaltung des optimierten Vorwärmeschemas skizziert. Der gesamte Speisewasserstrom wird zunächst in der Rauchgaswasserkondensationsanlage vorgewärmt. Diese Abwärme ist „kostenlos“ verfügbar, kann aber bei atmosphärischem Druck nur in diesem untersten, nach oben strikt begrenzten Temperaturbereich gewonnen werden. Anschließend wird der Gesamtstrom aufgeteilt auf die Kühlung der Verdichter von Luftzerlegungsanlage und CO_2 -Verdichtung sowie einen kleineren Rauchgaskühler nach dem Elektrofilter. Diese Anordnung entspricht

der Erkenntnis, dass die Verdichter hinsichtlich der Abwärmenutzung am effektivsten mit niedrigstmöglicher Kühlwassertemperatur bei möglichst hoher Aufwärmspanne zu betreiben sind. Eine letzte Vorwärmstufe für die beiden kältesten der genannten Teilströme stellt ein durch die untere Temperaturgrädigkeit begrenzter, größerer Rauchgaskühler vor dem Elektrofilter dar.

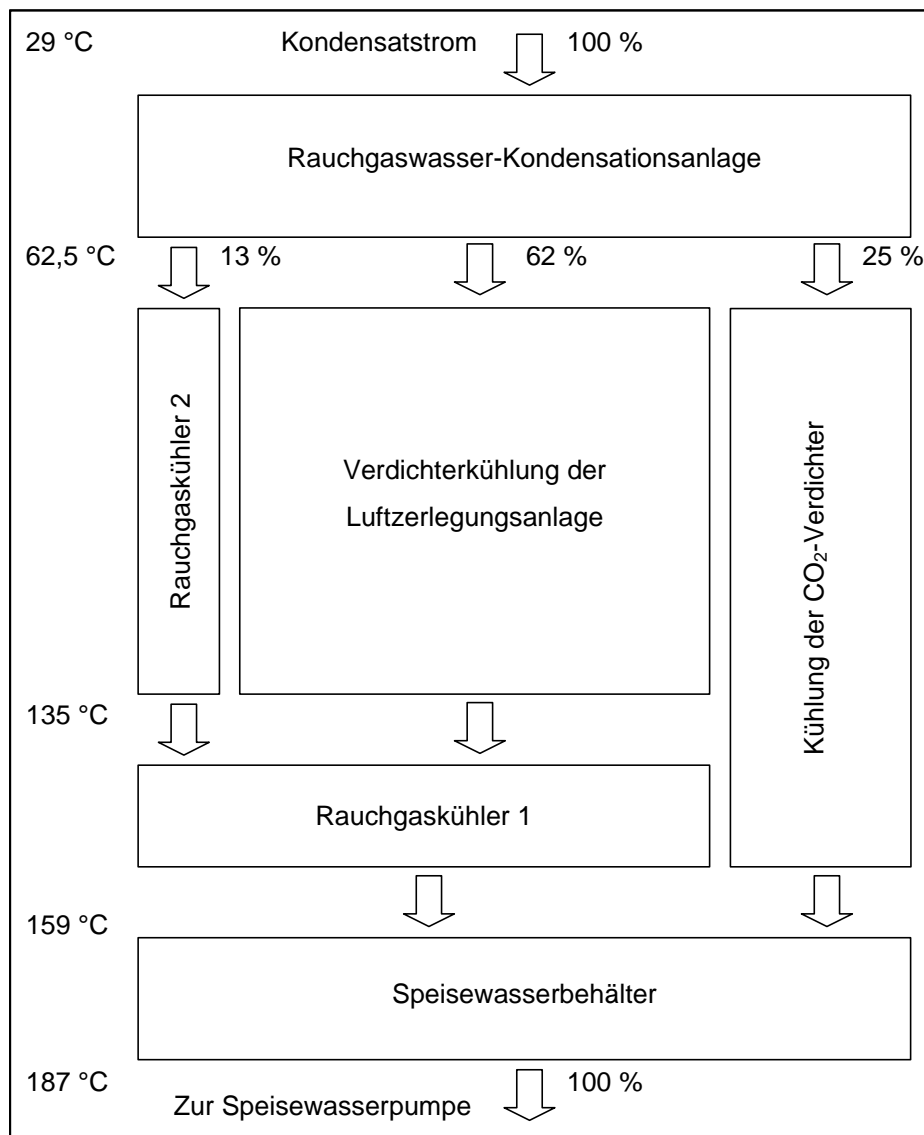


Bild 6: Speisewasservorwärmeschema

Durch die beschriebene Anordnung konnten die im Prozess entstehenden Abwärmemengen zu einem hohen Prozentsatz wieder eingekoppelt werden. Es wird auch ersichtlich, dass durch die Einbindung der Abwärmequellen keine Niederdruckvorwärmssäule im Temperaturbereich bis 160 °C mehr erforderlich ist und somit Anzapfdampf gespart wird.

Abwärmeorientierte Optimierung der Verdichtungsprozesse

Die Verdichter von Luftzerlegungsanlage und CO₂-Aufbereitung haben einen elektrischen Eigenbedarf von zusammen etwa 200 MW, die für den Gesamtprozess zunächst als exergetischer Verlust zu werten sind. Daher war es ein vorrangiges Ziel bei der Konzepterarbeitung, einen möglichst großen Nutzen aus der Abwärme der Verdichter zu ziehen und damit die Einbußen zu relativieren.

Temperaturbereich und Umfang der Abwärmegewinnung hängen von vielen Faktoren ab: Zum einen von den Verdichtungsendtemperaturen, die bei vorgegebenem Gesamtdruckverhältnis durch die Anzahl der Verdichtungsstufen und die Stufeneintrittstemperaturen bestimmt werden. Weiterhin spielen die Kühlwassermenge sowie dessen Eintrittstemperatur eine wichtige Rolle für die Optimierung. Das Ergebnis der Optimierungen ist wie folgt: Die Luftverdichtung der Luftzerlegungsanlage wird als eine zweistufige Verdichtung bei einem Gesamtdruckverhältnis von 5,7 angesetzt, während die Verdichtung des CO₂ von 1 auf 30 bar in drei Stufen erfolgen soll.

Ergebnisse

Der elektrische Wirkungsgrad des Oxyfuel-Prozesses liegt laut derzeitiger Analysen bei 31 bis 35 % ohne Kohlevortrocknung. Zieht man jedoch die oben beschriebene Schaltung mit fortschrittlichen Prozessparametern und Trockenbraunkohlefeuerung heran, so ergibt sich ein Wirkungsgrad (netto) von ca. 40 %. Der CO₂-Reinheitsgrad beträgt ohne eine REA etwa 95 %, während bei Einbindung einer Rauchgasentschwefelung das erzeugte CO₂ eine sehr gute technische Reinheit von >97 % besitzt (Verunreinigungen nur in Spuren).

4. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde unter anderem ein optimiertes Kraftwerkskonzept für Braunkohle vorgestellt, welches auf dem Oxyfuel-Prozess mit CO₂-Abscheidung basiert. Hierfür wurde weitgehend der aktuelle Stand der Technik zugrunde gelegt, und es konnte ein Nettowirkungsgrad von ca. 40 % erzielt werden (die Verdichtung des CO₂ auf 100 bar ist dabei bereits inbegriffen) bei einer Gesamtabseideleistung für das CO₂ von 98 %. Die vorliegenden Ergebnisse sowie intern durchgeführte Kostenschätzungen zeigen, dass der Oxyfuel-Prozess eine vielversprechende Option für zukünftige CO₂-freie Kraftwerksneubauten darstellt.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Hellfritsch, S., Gilli, P.G., Jentsch, N.: Concept for a Lignite-fired Power Plant Based on the Optimised Oxyfuel Process with CO₂ Recovery. VGB PowerTech 8/2004, S. 76-82, VGB PowerTech e.V., Essen, 2004
- [2] Andersson, K., Johnsson, F., Strömberg, L.: Large Scale CO₂ Capture – Applying the Concept of O₂/CO₂ Combustion to Commercial Process Data. VGB PowerTech 10/2003, S. 29-33, VGB PowerTech e.V., Essen, 2003
- [3] Hellfritsch, S.: Energie- und Massenbilanz für ein emissionsarmes Kraftwerk nach dem Oxyfuel-Prozess. Diplomarbeit Nr. 1637 (Lehrstuhl für Kraftwerkstechnik, TU Dresden), 2003
- [4] Birkestad, H.: Separation and compression of CO₂ in an O₂/CO₂-fired power plant. Master Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2002
- [5] Klutz, H.-J., Ewers, J.: Entwicklung der WTA-Feinkornrocknung. VDI Berichte Nr. 1495 „Entwicklungslinien in der Energie- und Kraftwerkstechnik“ Tagung Essen, 22./23. September 1999