

Ni Weidou
Wang Minghua
Song Shizhong

Developing high-efficiency, low-carbon, clean coal in china

In the last few decades, China has dramatically expanded access to energy and, as a result, has achieved nearly universal electrification (Figure 1). Although this accomplishment is notable, China's energy mix is facing several pressing issues with important domestic and global implications. China is coal-rich and, for this reason, continues to rely on coal for the majority of its primary energy (over 70 %), resulting in cost, reliability, and energy

security benefits. However, coal resources are being consumed rapidly. China has built, and is continuing to grow, massive industries that hinge on the availability of coal; therefore, coal conservation through more efficient utilization is in the nation's best interest.

This article was originally published in Cornerstone (Vol. 2), Issue 3, 2014, p. 29 – 33 (www.cornerstonemag.net)

Die Entwicklung von hocheffizienten, kohlenstoffarmen und umweltfreundlichen Kohle-Technologien in China

In den letzten Jahrzehnten hat China seine Energieversorgung dramatisch ausgebaut und als Ergebnis eine fast vollständige Elektrifizierung erreicht (Bild 1). Obwohl es sich hier um eine bemerkenswerte Leistung handelt, hat der chinesische Energiemix mehrere drängende Fragen mit erheblichen nationalen und weltweiten Auswirkungen aufgeworfen. China ist reich an Kohle und setzt aus diesem Grund auch weiterhin für den Großteil der Primärenergieerzeugung auf diesen Energieträger (über 70%), was Vorteile im Hinblick auf Kosten, Zuverlässigkeit und

Energieversorgungssicherheit mit sich bringt. Die Kohlevorkommen werden jedoch schnell und stetig abgebaut. China hat bei anhaltendem Wachstum eine enorme Industriebasis geschaffen, die von der Verfügbarkeit der Kohle abhängig ist. Daher liegt eine Erhaltung der Kohle durch effizientere Nutzung im besten Interesse des Landes.

Erstveröffentlichung dieses Artikels in Cornerstone (Band 2), Ausgabe 3, 2014, S. 29 – 33 (www.cornerstonemag.net).

As with any country, energy security is an important issue for China. With few oil reserves, China relies on imports for a large percentage of its oil, a fact that will be difficult to change as China's oil consumption continues to rise. Approximately 200 mt of oil are produced domestically each year; experts have stated that this amount is a suitable volume for China's oil production and larger volumes could hinder future drilling operations (1). China's annual oil consumption has reached 450 mt, which means that China must rely on imports for more than half of its oil.

In addition to national resource conservation and energy security issues, the environmental impact of China's energy production and utilization has become an increasingly pronounced global concern. One of the most problematic issues is the poor air quality in China's urban centers, which can be primarily attributed to two main factors: direct coal combustion without emissions controls and emissions from the combustion of transportation fuels.

The coal-fired power plants being built in China today are larger and more efficient than those of the past. However, many plants still operate at low efficiency and/or have minimal or no

Wie für jedes andere Land auch, ist die Energieversorgungssicherheit eine Frage von großer Wichtigkeit für China. Als Land mit nur geringen Ölvorkommen ist China für einen großen Teil seines Bedarfs von Importen abhängig. Das lässt sich nur schwer ändern, da Chinas Ölverbrauch auch weiter ansteigt. Jährlich werden ca. 200 Mio. t heimisches Öl gefördert. Fachleute vertreten die Ansicht, dass diese Produktionsmengen angemessen sind und dass größere Mengen problematisch für weitere Bohrtätigkeiten wären (1). Chinas jährlicher Ölverbrauch ist mittlerweile bei 450 Mio. t angelangt, was bedeutet, dass China für mehr als die Hälfte seines Öls von Importen abhängig ist.

Zu den Fragen der Erhaltung der heimischen Ressourcen und der Energieversorgungssicherheit hinzu kommt die stark zunehmende weltweite Besorgnis über die Auswirkungen der chinesischen Energieerzeugung und Nutzung auf die Umwelt. Eines der größten Probleme stellt die schlechte Luftqualität in Chinas städtischen Zentren dar, die im Wesentlichen auf zwei Hauptfaktoren zurückzuführen ist: die direkte Verbrennung von Kohle ohne Emissionskontrolle sowie Emissionen aus der Verbrennung von Treibstoff im Transportsektor.



Fig. 1. China has achieved near full electrification in recent years, but the country's energy strategy is being revised.

Bild 1. China hat in den letzten Jahren die fast vollständige Elektrifizierung geschaffen; dennoch wird die Energiestrategie des Landes einer Überprüfung unterzogen. Photo / Foto: Cornerstone

emission controls. In addition, direct combustion of coal in industrial applications or for household heating adds to the pollution. These factors contribute to the release of SO_2 , NO_x , mercury and other heavy metals, and particulate matter (especially fine particulate matter such as $\text{PM}_{2.5}$).

The burning of transportation fuels is another key contributor to air pollution. The gasoline and diesel produced by China's oil refining industry have always had a relatively high sulfur content, which leads to increased production of particulate matter (including $\text{PM}_{2.5}$).

Another environmental concern is climate change. If the future rise in global temperatures is to be limited to 2°C , some experts have projected that global CO_2 emissions in 2050 would need to be about 50 % lower than those in 1990 (2). China has overtaken the U.S. as the world's largest CO_2 emitter with about 7 billion t released each year, which means that China's actions are pivotal to achieving success in mitigating climate change. For this reason, China is under tremendous international pressure to reduce its emissions.

Even with developed countries committed to reducing their emissions by 80 %, developing countries would still need to bring down their overall emissions to 36 % below 2005 levels. Coal combustion and burning transportation fuels are the main sources of CO_2 emissions in China. Although China has strengthened efforts on energy conservation and the development of nuclear and renewable energy, China's CO_2 emissions are expected to continue increasing; China must also be practical about reducing emissions as it remains a developing country. Therefore, China should be proactive about how best to address emissions reductions with solutions that can be realistically implemented.

Die derzeit in China im Bau befindlichen Kohlekraftwerke sind größer und effizienter als die in der Vergangenheit gebauten. Dennoch arbeiten viele Kraftwerke mit niedrigen Wirkungsgraden und/oder verfügen nur über minimale oder gar keine Emissionskontrollen. Die direkte Verbrennung von Kohle für Industrieanwendungen oder die Beheizung von Haushalten tragen zusätzlich zur Luftverschmutzung bei. Diese Bereiche sind an der Freisetzung von SO_2 , NO_x , Quecksilber und anderen Schwermetallen sowie von Schadstoffpartikeln (insbesondere Feinstaub wie $\text{PM}_{2.5}$) beteiligt.

Die Verbrennung von Treibstoff ist ein weiterer Hauptverursacher der Luftverschmutzung. Die in chinesischen Raffinerien produzierten Kraftstoffe Benzin und Diesel sind seit jeher durch einen relativ hohen Schwefelgehalt gekennzeichnet, was zu erhöhter Bildung von Feinstaub (einschließlich $\text{PM}_{2.5}$) führt.

Der Klimawandel gibt in punkto Umwelt weiteren Anlass zur Sorge. Wenn der zukünftige Anstieg der globalen Temperaturen auf 2°C begrenzt werden soll, müssten die globalen CO_2 -Emissionen nach Schätzungen mancher Fachleute im Jahr 2050 um 50 % niedriger sein als im Jahr 1990 (2). Mit pro Jahr 7 Mrd. t freigesetztem Kohlendioxid hat China die USA als weltgrößten CO_2 -Emittenten überholt, was bedeutet, dass Chinas Vorgehen maßgeblich für eine erfolgreiche Abmilderung des Klimawandels ist. Aus diesem Grund steht China unter enormem Druck, seine Emissionen zu reduzieren.

Selbst wenn die entwickelten Länder die Verpflichtung zur Reduzierung ihrer Emissionen um 80 % einhalten, müssten die Entwicklungsländer ihre Gesamtemissionen immer noch um 36 % unter das Niveau des Jahres 2005 drücken. Die Verfeuerung von Kohle und die Verbrennung von Treibstoffen stellen die Hauptursachen der CO_2 -Emissionen in China dar. Obwohl China seine Anstrengungen bei der Energieeinsparung und der Entwicklung von Kernenergie und erneuerbaren Energien verstärkt hat, wird erwartet, dass Chinas CO_2 -Emissionen weiter ansteigen. Ebenso muss China einen praktikablen Ansatz bei der Reduzierung von Emissionen wählen, da es nach wie vor ein sich entwickelndes Land ist. Daher sollte China proaktiv nach den bestmöglichen und realistisch umsetzbaren Lösungen zur Verringerung von Emissionen suchen. Obwohl Luftverschmutzung und Klimawandel höchst reale Bedrohungen darstellen, kann China seinen Energiemix und seine Infrastruktur auf kurze Sicht nicht drastisch ändern, so dass Strategien für eine gesteigerte Effizienz in der Kohlenutzung und die Verbesserung der Qualität von Kraftstoffen für den Transportsektor ein wichtiges Thema geworden sind.

Optimierte Ansätze zur Kohlenutzung durch effizientere, kohlenstoffarme und sauberere Technologien, einschließlich der Herstellung von saubereren Treibstoffen aus Kohle, könnten die Lösung für eine Vielzahl von Problemen sein, mit denen der energieerzeugende Sektor in China konfrontiert ist. Obwohl es viele Ansätze für eine sauberere und effizientere Kohlenutzung gibt, sind wir der Ansicht, dass die beste Option, die alle angesprochenen Probleme abdeckt, die Vergasung von Kohle zur Erzeugung von Chemikalien, Kraftstoffen, elektrischem Strom – d.h. Polygeneration – darstellt, einschließlich Abscheidung, Verwertung und Speicherung von CO_2 (CCUS).

Mögliche Ansätze für die Rolle der Kohle in der hocheffizienten, kohlenstoffarmen und sauberen Energieerzeugung

Gegenwärtig befinden sich mehrere saubere und effiziente Verfahren zur Umwandlung von Kohle in der Entwicklung oder sind bereits verfügbar.

While air pollution and climate change are very real concerns, China's energy mix and infrastructure cannot be drastically modified in the short term, so strategies to improve the efficiency of coal utilization and improve transportation fuel quality have become an important topic.

Optimized approaches to coal utilization in a high-efficiency, low-carbon, cleaner manner, including producing cleaner transportation fuels from coal, could be the solution to the myriad concerns facing China's energy industry. Although there are many approaches to cleaner and more efficient coal utilization, we believe the most valuable option that addresses all the problems explained is gasification of coal to produce chemicals, fuels, power (i.e., polygeneration), and eventually carbon capture, utilization, and storage (CCUS).

Approaches To Coal's Role in High-Efficiency, Low-Carbon, Clean Energy

Several clean and efficient coal conversion methods are currently under development or already available.

Carbon Capture, Utilization and Storage

Ultimately, the lowest-carbon use of coal is tied to capturing and storing CO₂. China's CCUS strategies should be implemented after considering the impact to China's economy, energy infrastructure, and also the unique opportunities possible to China because it is still growing. We believe China should develop its own technologies and not simply follow the paths chosen by other nations. China's CCUS strategies have potential; the key challenge is how best to coordinate and manage overall efforts.

The costs associated with CCUS are, in part, tied to the cost of the CO₂ capture, which can vary dramatically between different coal utilization options. In terms of power generation, there are two main focus areas for clean coal technology development in China. The first is high-efficiency supercritical and ultra-supercritical coal-fired power plants and the other is gasification – for power production this entails integrated gasification combined cycle (IGCC).

High-Efficiency Power Plants

China's state-of-the-art high-efficiency power plants are some of the best in the world; these plants produce less CO₂ compared to less efficient subcritical plants and are an important first step in reducing CO₂ emissions.

An example of one such plant is Shanghai Waigaoqiao No.3 power plant (Figure 2). At 75 – 81% capacity this plant has an average coal consumption rate of 276 g/kWh (including desulfurization and denitrification – an actual annual efficiency of 44.5%). This compares favorably with China's current average coal consumption for power generation, 330 g/kWh, as well as with the world's most efficient power plant, the 400-MW Nordjylland Power Station No. 3 in Denmark, with double reheat and cold seawater cooling units. At a capacity of 75%, the coal consumption rate at Nordjylland is 288 g/kWh.

China's 600°C ultra-supercritical plants are constructed using expensive imported materials that account for 50% of the cost of a 1000-MW boiler. Increases in temperature and pressure would require even higher-standard materials. Furthermore, in direct

CO₂-Abscheidung, Verwertung und Speicherung

Die kohlenstoffärmste Nutzung der Kohle stellt letztendlich die Abscheidung und Speicherung von CO₂ dar. Chinas CCUS-Strategien sollten unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf die chinesische Volkswirtschaft, Energieinfrastruktur und auf die einzigartigen Möglichkeiten für das immer noch im Wachstum begriffene China umgesetzt werden. Wir sind der Auffassung, dass China seine eigenen Technologien entwickeln und nicht einfach den von anderen Ländern eingeschlagenen Wegen folgen sollte. Chinas CCUS-Strategien haben Potential; die größte Herausforderung besteht in der bestmöglichen Koordinierung und Steuerung aller Anstrengungen.

Die mit CCUS verbundenen Kosten, hängen teilweise mit den Kosten der CO₂-Abscheidung zusammen, die je nach den verschiedenen Kohleverwertungsoptionen erheblich schwanken können. In punkto Stromerzeugung existieren zwei Hauptoptionen für die Entwicklung einer „Saubere-Kohle“-Technologie in China. Die erste Option sind hocheffiziente superkritische und ultrakritische Kohlekraftwerke und die andere ist die Kohlevergasung – für Stromerzeugung ist in diesem Fall der Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung (IGCC) erforderlich.

Hocheffiziente Kraftwerke

Chinas hocheffiziente Kraftwerke sind auf dem neuesten Stand der Technik und gehören zu den besten weltweit. Im Vergleich zu weniger effizienten unterkritischen Kraftwerken erzeugen sie weniger CO₂ und stellen einen ersten wichtigen Schritt zur Verringerung von CO₂-Emissionen dar.

Ein Beispiel dafür ist das Kraftwerk Shanghai Waigaoqiao Nr. 3 (Bild 2). Bei einer Kapazität von 75 – 81% verbraucht dieses Kraftwerk 276 g/kWh einschließlich Entschwefelung und Entstickung – ein effektiver Jahresnutzungsgrad von 44,5%. Dieser Wert ist günstig, verglichen sowohl mit Chinas derzeitigem Durchschnittsverbrauch an Kohle für die Verstromung von 330 g/kWh als auch mit dem effizientesten Kraftwerk der Welt, dem 400-MW Kraftwerk Nordjylland Nr. 3 in Dänemark mit doppelter Zwischenüberhitzung und Kühlung mit kaltem Seewasser. Bei einer Kapazität von 75% beträgt der Kohleverbrauch in Nordjylland 288 g/kWh.

Chinas ultrakritische 600°C-Kraftwerke werden unter Verwendung teurer Importmaterialien gebaut, die 50% der Kosten eines 1000-MW Kessels ausmachen. Eine weitere Steigerung der Temperaturen und Drücke würde sogar Materialien von noch höherer Qualität erfordern. Des Weiteren verursacht eine Abscheidung von CO₂ aus dem Rauchgas bei der direkten Kohleverbrennung relativ hohe Kosten. Zur Senkung der Kosten ist auch hier ein erheblich höherer Aufwand für Forschung und Entwicklung zu treiben. Dies bedeutet, dass es trotz der unbedingt erforderlichen und sicherlich fortzuführenden Entwicklung hocheffizienter Kohlekraftwerke immer noch große Herausforderungen gibt und wir daher die Auffassung vertreten, dass die vorgenannte Option nicht die einzige sein sollte, die in China verfolgt wird.

Möglichkeiten bei Kohlevergasung

Verglichen mit hocheffizienten Kohlekraftwerken befindet sich die IGCC-Technologie in einem frühen Entwicklungsstadium und kann größeres Potential für Effizienzverbesserungen in der Stromerzeugung bieten. Da IGCC ebenfalls einzigartige Vorzüge im Hinblick auf die Abscheidung von Emissionen aufweist und mit Polygeneration zwecks Reduzierung der Baukosten gekoppelt werden kann, ist hier



*Fig. 2. The Shanghai Waigaoqiao No. 3 power plant is one of the many high-efficiency power plants built in China in recent years.
Bild 2. Das Kraftwerk Shanghai Waigaoqiao Nr. 3 ist eines der vielen in China in den letzten Jahren gebauten hocheffizienten Kraftwerke.
Photo / Foto: Cornerstone*

coal combustion, collecting CO₂ from the flue gas comes at a relatively high cost; much more research and development is needed to bring down costs.

Therefore, even though the development of high-efficiency coal-fired power plants is vital and will assuredly continue, notable challenges still exist and we believe this should not be the only option pursued by China.

Approaches Made Possible Through Gasification

Compared to high-efficiency coal-fired power plants, IGCC is at an early stage of development and, thus, may offer greater potential for improvements in terms of power generation efficiency. As IGCC also has unique advantages in terms of capturing emissions and can be coupled with polygeneration to reduce construction costs, it is worth further development.

Capture of emissions from a gasification system, including IGCC power plants, differs because it occurs upstream of power generation at a higher concentration and/or pressure. For a conventional power plant, CO₂ capture will reduce the plant's efficiency by about 11%; for an IGCC power plant, the efficiency loss for CO₂ capture is less, about 6 – 7%. Although the efficiency is high and the capture of emissions is simpler, there is a substantial upfront investment for IGCC, RMB12,000/kWh (US-\$1900/kWh).

Thanks to many years of demonstration and commercial use, the reliability of IGCC plants has been gradually increasing. Still, in addition to the costs, another major issue with IGCC plants is that most such plants are not suitable for variable load operation.

For the sole purpose of power generation, gasification is not economically competitive in China and, in our opinion, therefore not currently a suitable solution for widespread deployment. Even so, with the aspiration of bringing down costs, some dem-

eine Weiterentwicklung lohnend. Die Abscheidung von Emissionen in einem Kohlevergasungssystem, einschließlich der IGCC-Kraftwerke, ist anders, da sie vor der Stromerzeugung bei höherer Konzentration und/oder höherem Druck erfolgt. In einem konventionellen Kraftwerk wird die Anlageneffizienz durch die CO₂-Abscheidung um ungefähr 11% reduziert, wohingegen der Effizienzverlust für die CO₂-Abscheidung in einem IGCC-Kraftwerk geringer ist und bei ca. 6 – 7 % liegt. Obwohl die Effizienz höher und die Abscheidung von Emissionen einfacher ist, fallen für IGCC erhebliche Vorinvestitionen in Höhe von RMB 12.000/kWh (US-\$1900/kWh) an.

Dank der langjährigen Demonstrationsphase und des kommerziellen Betriebs ist die Zuverlässigkeit von IGCC-Kraftwerken ständig gestiegen. Zusätzlich zu den Kosten existiert im Falle der IGCC-Kraftwerke jedoch ein weiteres großes Problem, nämlich, dass viele dieser Kraftwerke nicht für variablen Lastbetrieb geeignet sind. Für den alleinigen Zweck der Stromerzeugung ist die Kohlevergasung unter wirtschaftlichem Aspekt nicht konkurrenzfähig und nach unserer Auffassung daher derzeit kein geeigneter Kandidat für eine weitere Ausweitung. Dennoch sind in China in der Hoffnung auf eine mögliche Kostensenkung IGCC Demonstrations- und Betriebsaktivitäten im Gange. So hat z.B. die Huaneng Gruppe im Rahmen des GreenGen-Projekts in Tianjin ein 265-MW IGCC-Kraftwerk gebaut und betrieben.

Eine weitere, bedeutende Clean Coal-Technologie, die sich die Kohlevergasung zunutze macht, ist die Polygeneration, d.h. eine polyvalente Energieerzeugung, die für die Kombination der Coal-to-Chemicals/Kohleverflüssigung mit IGCC eingesetzt werden kann. Im Polygenerationsprozess kann Kohle mit Windenergie, Solarenergie, Biomasse usw. in einer Vielzahl möglicher Konfigurationen zur Erzeugung eines breiten Spektrums von Produkten – einschließlich Chemikalien, Brennstoffe, Strom usw. – kombiniert werden. Natürlich ist auch Treibstoff mit niedrigem Schwefelgehalt als eines der potentiellen Produkte aus einem Polygenerationssystem denkbar, der obendrein Energieversorgungssicherheit und Vorteile für die Umwelt mit sich bringt. Ein ganz wichtiger Gesichtspunkt dabei ist auch, dass die Technologie der Polygeneration keine größeren technologischen Durchbrüche erfordert. Sie stützt sich auf verfügbare und bewährte technische Verfahren und hat somit ein großes Potential, die saubere und effiziente Nutzung von Kohle voranzubringen und damit ihre Bedeutung für die weitere Entwicklung zu sichern.

Die Polygeneration ermöglicht einen hohen Integrationsgrad der Kraftwerke und eine Optimierung des gesamten Energie- und Materialflusses. Bei einem Kohlevergasungsprozess mit nur einem erzeugten Produkt sind die Kohleeinsparungen bei Parallelsystemen in der gleichen Anlage nur minimal. Hingegen können integrierte serielle Systeme in einem Kraftwerk mit polyvalenter Erzeugung und mehreren Produkten signifikante Mengen an Kohle einsparen. Tatsächlich kann die Effizienz eines integrierten seriellen Systems ohne CO-Konvertierung einen Wert von 45,5% erreichen. Der Wasserverbrauch pro erzeugter Energieeinheit ist bei Polygenerationssystemen auch geringer als bei konventionellen Kraftwerken.

Im Zuge des technologischen Fortschritts kann die Effizienz der Polygenerationstechnologien noch weiter gesteigert werden. So kann z.B. der Wirkungsgrad von Kohlevergasungssystemen mit Hochtemperatur-Syngasreinigung auf 49,3% gesteigert werden. Bei Einsatz der Technologie der Sauerstoffabscheidung mit Ionen-Austausch-Membran kann der Systemwirkungsgrad auf 50,1% angehoben werden. Bei Gasturbinen der 1700°C-Klasse kann der Wirkungsgrad

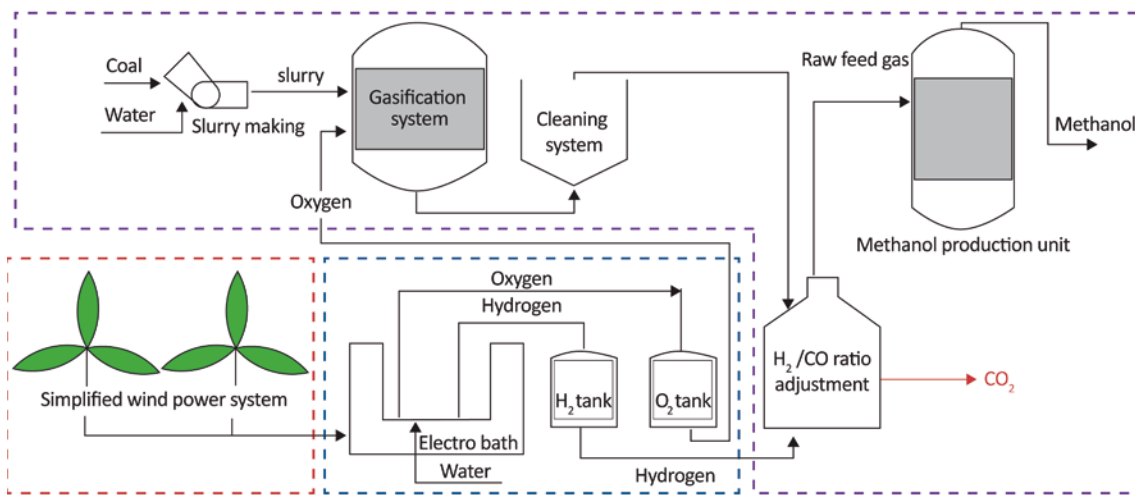


Fig. 3. Coal can be integrated with renewable energy sources through gasification; in this example methanol can be produced with a CO₂ stream ready for CCUS.

Bild 3. Kohle kann durch Kohlevergasung mit erneuerbaren Energiequellen verzahnt werden; das obige Beispiel zeigt die Erzeugung von Methanol mit CO₂, bereit zur Weiterbehandlung durch CCUS.

onstratation and deployment of IGCC is proceeding in China. For instance, the Huaneng Group has built and operated a 265-MW IGCC power plant in Tianjin under the GreenGen project.

Another important clean coal technology that employs gasification is polygeneration, which can be used to combine coal-to-chemicals/fuels and IGCC. In a polygeneration process, coal can be combined with wind, solar, biomass, etc., in a variety of configurations to produce a wide array of products (including chemicals, fuels, electricity, etc.). Of course, one potential product of polygeneration systems could also be low-sulfur transportation fuels – leading to energy security and environmental benefits. Importantly, polygeneration technology does not require major technical breakthroughs. It is based on existing, proven technologies and thus has much potential to advance the clean and efficient utilization of coal, making it an important direction for development.

Polygeneration allows for plants to be highly integrated and for the overall energy and materials flow to be optimized. With a single-product gasification process, the coal savings for parallel systems at the same facility is minimal. However, integrated serial systems at a polygeneration facility with multiple products can save a significant amount of coal. In fact, the efficiency of an integrated serial system can reach 45.5% without the CO shift. The water consumption per unit power produced for polygeneration systems is also lower than that of conventional power plants.

As the technology advances, the efficiency of polygeneration technologies can be further enhanced. For example, the efficiency of gasification systems with high-temperature syngas cleanup can be raised to 49.3%. When ionic membrane oxygen separation technology is employed, the system efficiency can be raised to 50.1%. For 1700°C-class gas turbines efficiency can reach 53%. Finally, coal-water slurry preheating technology gasification systems can offer efficiencies of 57.3%. Overall, coal-based polygeneration systems have tremendous potential for using coal cleanly and efficiently, particularly when power and chemicals are both produced.

53% erreichen. Und schließlich können Kohlevergasungssysteme mit Kohle-Wasser-Gemisch-Vorwärmung sogar Wirkungsgrade von 57,3% erreichen. Insgesamt gesehen haben Polygenerationssysteme auf Kohlebasis ein enormes Potential für die saubere und effiziente Nutzung von Kohle. Dies gilt insbesondere, wenn sowohl elektrische Energie als auch Chemikalien erzeugt werden.

Wenn China nicht über die traditionellen technologischen Ansätze zur Kohlenutzung – d.h. direkte Verbrennung – hinaus gelangt, wird dies, wie wir glauben, zu einer Reihe von Problemen mit der Umwelt und mit Treibhausgasemissionen führen. Daher meinen wir, dass Chinas modernisierte Strategien zur Energieentwicklung auf den Ausbau der Polygeneration setzen müssen, weil nur diese Energieeffizienz Versorgungssicherheit und Vorteile für die Umwelt bieten kann.

Drängende Notwendigkeiten im Rahmen einer starken Energiestrategie mit Polygeneration

Aufgrund der derzeitigen Energiezwänge und Herausforderungen in China ist die synergetische Nutzung von Kohle zusammen mit anderen Energiequellen eine Notwendigkeit. Wir sind der Auffassung, dass diese Integration der Schlüssel nicht nur zu einer kohlenstoffarmen Entwicklung in China, sondern auch zur bestmöglichen Nutzbarmachung unterschiedlicher Energiequellen ist. Die Polygeneration bietet einmalige Möglichkeiten für eine effizientere Nutzung von Kohle, zur Verzahnung von kohlebasierten Energieerzeugungssystemen mit alternativen Energiequellen und zu einer drastischen Verringerung von CO₂-Emissionen (Bild 3). Zur Erzielung größerer Synergien ist der Aufbau eines intelligenten Energienetzwerks erforderlich, das die Integration von Informationstechnologie in die Energiesysteme ermöglicht, um zu einer Optimierung des Energieflusses in China zu gelangen.

Herstellung von chemischen Produkten im Rahmen der Polygeneration

Wenn man die hohen Kosten der IGCC-Stromerzeugung im Hinblick auf die zukünftigen Anforderungen zur Kontrolle von Emissionen

If China does not expand outside only the traditional technological approaches to coal utilization (i. e., direct combustion), we believe this could lead to a series of problems related to the environment and greenhouse gas emissions. Therefore, from this point forward we believe China's modernized energy development strategies must emphasize the deployment of polygeneration, which could offer energy efficiency, energy security, and environmental benefits.

Pressing Needs Under a Strong Polygeneration Energy Strategy

Under China's current energy constraints and challenges, the synergetic use of coal with other energy sources is needed. We believe this integration is the key to low-carbon development in China and also to utilizing different energy sources in the most appropriate way possible. Polygeneration offers unique opportunities to use coal more efficiently, integrate coal energy systems with alternative energy sources, and dramatically reduce CO₂ emissions (Figure 3). In order to achieve better synergy, a smart energy network must be established, which will allow the integration of information technology within energy systems to optimize the flow of energy in China.

Polygeneration with Chemical Products

Considering the high costs of IGCC power generation, when taking into account the future requirements for controlling emissions, including SO₂, NO_x, particulate matter, and mercury, as well as CO₂, the best approach today is to reduce costs through chemical product polygeneration.

China has recently built several hundred gigawatts' worth of pulverized coal supercritical and ultra-supercritical generating units. These high-efficiency plants can be refitted with CO₂ capture in the future. CCUS can also be applied to polygeneration facilities, which offer the lowest-cost option for CO₂ capture and could be used to support demonstrations of CO₂ utilization and storage in the near term. As it takes time for an energy process and systems to develop and mature, if the polygeneration model is not promoted now, the delay could mean paying a higher price in the future.

In terms of energy security, the liquid fuels produced by coal-based polygeneration, particularly methanol and dimethyl ether, are excellent coal-based alternatives for transportation fuels and can help alleviate China's oil shortage with much-needed low-sulfur fuels. At the same time, methanol can be used to produce polyethylene and polypropylene, an example of using coal-to-chemicals to replace a portion of conventional petrochemicals – again reducing oil imports.

China has already mastered the leading polygeneration technologies including large-scale coal gasification, which has been successfully demonstrated in industrial applications. For example, the Yankuang Group's IGCC and methanol polygeneration unit in Shandong is a global first-of-a-kind and has demonstrated long-term, stable operation. This system operates with an efficiency of up to 57.16%, which is 3.14 percentage points higher than has been achieved by independent coal-to-methanol and IGCC systems in China (3). Its power conversion efficiency is as high as 39.5%. As long as the various sectors in China (coal, chemical and power)

einschließlich SO₂, NO_x, Feinstaub, Quecksilber und CO₂, betrachtet, scheint der beste Ansatz derzeit derjenige zu sein, der zu einer Kostensenkung durch Erzeugung chemischer Produkte im Rahmen der Polygeneration führt.

China hat kürzlich einige superkritische und ultrakritische Staubkessel-Stromerzeugungsanlagen mit Kapazitäten von mehreren hundert Gigawatt gebaut. Diese hocheffizienten Kraftwerke können zukünftig mit CO₂-Abscheidung nachgerüstet werden. CCUS kann auch bei Polygenerationsanlagen eingesetzt werden, die die kostengünstigste Option für die CO₂-Abscheidung darstellen und zur Demonstration von Speichermöglichkeiten in der nahen Zukunft dienen können. Da Energieerzeugungsprozesse und Systeme eine gewisse Entwicklungs- und Reifezeit benötigen, könnte die Verzögerung, die entsteht, wenn das polyvalente Modell nicht jetzt gefördert wird, bedeuten, dass in der Zukunft dafür ein höherer Preis zu entrichten wäre.

Unter dem Aspekt der Energieversorgungssicherheit sind die durch kohlebasierte Polygeneration hergestellten Flüssigbrennstoffe, insbesondere Methanol und Dimethylether, ausgezeichnete kohlebasierte Alternativen für Kraftstoffe in Transport und Verkehr und können dazu beitragen, Chinas Ölknappheit durch dringend erforderliche Kraftstoffe mit niedrigem Schwefelgehalt etwas aufzufangen. Parallel dazu kann Methanol für die Herstellung von Polyethylen und Polypropylen verwendet werden, was ein gutes Beispiel für den Einsatz der Kohlechemie wäre, um einen Teil der konventionellen petrochemischen Produkte zu ersetzen und somit wiederum die Ölimporte zu verringern.

China beherrscht bereits die führenden Polygenerationstechnologien einschließlich der Kohlevergasung im großen Stil, was in industriellen Anwendungen schon erfolgreich demonstriert wurde. So ist z.B. die polyvalente IGCC- und Methanol-Erzeugungsanlage der Yankuang Gruppe in Shandong weltweit einzigartig und hat ihre Eignung schon im stabilen Langzeitbetrieb nachgewiesen. Dieses System arbeitet mit einem Wirkungsgrad von bis zu 57,16%, was 3,14 Prozentpunkte über den Werten liegt, die von unabhängigen Kohle/Methanol-Umwandlungs- und IGCC-Systemen in China erreicht wurden (3). Der Energieumwandlungswirkungsgrad der Anlage liegt bei 39,5%. So lange es den verschiedenen Sektoren in China – Kohle, Chemie und Stromerzeugung – gelingt, die einer Zusammenarbeit im Wege stehenden Schranken zu überwinden, kann China sich durch internationale Kooperation das Potenzial der Polygeneration zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Verringerung von Emissionen zunutze machen.

Synergieeffekte mit erneuerbaren Energien

Chinas Windenergiekapazität steht an erster Stelle in der Welt; dennoch sind ca. 30% der in China installierten Windkraftanlagen nicht am Netz. Einige der an das Netz angeschlossenen Windfarmen liefern aus verschiedenen Gründen nur eingeschränkt Energie, was wiederum einer Energievergeudung gleichkommt.

China sucht derzeit nach Wegen für eine großflächige Windnutzung, ohne die gesamte aus anderen Quellen gelieferte Energie zu beeinträchtigen. Eine verfolgenswerte Strategie bestünde in größeren Synergien zwischen Windenergie und der sich schnell entwickelnden Coal-to-Chemicals-Prozesse sowie dem bereits angesprochenen Sektor der Polygeneration. China hat Regionen, die zwar reich an Wind und Kohlevorkommen, dafür aber sehr abgelegen sind. Diese Abgelegenheit stellt eine Herausforderung für den Kohletransport und die Energieübertragung dar, bietet jedoch Möglichkeiten für eine synergetische Energienutzung.

are able to break the barriers to cooperation, along with international cooperation, we can tap the potential of polygeneration to improve energy efficiency and reduce emissions.

Synergy with Renewables

China's wind power capacity ranks first in the world, but about 30% of the wind turbines installed in China are off-grid. Even some of the on-grid wind farms are restricted in their power generation for various reasons, which results in wasted energy.

China now looks to find a way to deploy wind on a larger scale without adversely impacting the overall energy served by other sources. One strategy worth exploring is increased synergy between wind energy and the rapidly developing coal-to-chemicals as well as the proposed polygeneration sector. In China, remote areas are often rich in wind and coal; this remoteness poses challenges related to coal transportation as well as power transmission, but offers opportunities for synergetic energy utilization.

An example of a potential solution to using remote resources, including clean energy, is taking advantage of synergy between wind power and methanol production. The basis of such a concept is to use off-grid wind power to carry out electrolysis of water (i. e., breaking down water molecules to produce oxygen and hydrogen). The oxygen can be supplied to a gasifier and the hydrogen can be added to carbon-rich syngas produced by a coal gasifier. The ratio of H₂ to CO can thus be adjusted to the appropriate level for methanol production. Compared to conventional coal-based methanol production systems, this integrated system eliminates the need for an expensive and energy-intensive air separation unit, which greatly reduces the amount of gas conversion. With the same amount of coal, the synergetic solution produces twice the amount of methanol. Most of the carbon molecules from the coal are used in the methanol products, thus significantly reducing CO₂ emissions and thereby achieving the best overall results in the use of energy and resources. This is an example of a solution for the problems of wind energy application and that of substantial CO₂ emissions.

Recently, many large cities have been eager to obtain more clean energy, leading many areas that are rich in coal resources (particularly the remote areas of Xinjiang in Western China) and large corporations to turn their attention to a new industrial chain for synthetic natural gas (SNG). Although the energy efficiency of converting coal to SNG is only about 60%, long gas pipelines are more efficient than transporting coal over long distances. In terms of end application, since it is a clean, gaseous fuel, it can be used in a variety of advanced energy systems, technologies, and equipment (such as distributed energy and combined heating, cooling and power production) for more efficient applications. In this way, the full industry chain may reap the benefits of improved overall energy efficiency and reduced CO₂ emissions. However, the key issue regarding the emission and treatment of CO₂ generated from converting coal to SNG remains. Similar to the example with the methanol plant, if wind can be used to produce the oxygen and hydrogen from the electrolysis of water, the amount of SNG produced per unit coal could be multiplied, thus significantly reducing CO₂ emissions.

Looking at the energy system as a whole, this type of synergy is worth in-depth research to resolve issues surrounding essen-

Ein Beispiel für die mögliche Nutzung abseits liegender Energiequellen, einschließlich sauberer Energie, macht sich die Synergie zwischen Windkraft und Methanolproduktion zunutze. Die Grundidee hinter diesem Konzept besteht in der Nutzung von nicht in das Netz eingespeistem Windstrom für die Elektrolyse von Wasser, d.h. die Aufspaltung von Wassermolekülen zur Gewinnung von Sauerstoff und Wasserstoff. Der Sauerstoff kann in einem Vergasungsprozess verwendet werden, und der Wasserstoff kann kohlenstoffreichem Synthesegas aus der Kohlevergasung zugefügt werden. Das Verhältnis von H₂ zu CO kann dann so eingestellt werden, wie es zur Erzeugung von Methanol erforderlich ist. Im Vergleich zu konventionellen, kohlebasierten Methanol-Produktionsanlagen kommt dieses integrierte System ohne den sonst erforderlichen teuren und energieintensiven Luftabscheider aus, was einer erheblichen Verringerung der Gaskonvertierung gleichkommt. Mit der gleichen Kohlemenge erzeugt die synergetische Lösung die doppelte Menge an Methanol. Der größte Teil der Kohlenstoffmoleküle aus der Kohle wird in den Methanolprodukten verwendet und leistet somit einen Beitrag zur signifikanten Absenkung der CO₂-Emissionen bei gleichzeitiger Erzielung der besten Gesamtergebnisse im Hinblick auf die Nutzung von Energie und Ressourcen. Dies ist ein Beispiel für eine Lösung der Probleme bei der Nutzung von Windenergie und bei erheblichen CO₂-Emissionen.

Kürzlich haben viele große Städte ihr Interesse am Bezug von sauberer Energie kundgetan, was viele kohlereiche Regionen – insbesondere die abgelegenen Regionen um Xinjiang in West-China – und große Unternehmen dazu veranlasst hat, ihre Aufmerksamkeit auf eine neue industrielle Wertschöpfungskette für synthetisches Erdgas (SNG) zu richten. Obwohl der Wirkungsgrad der Umwandlung von Kohle in SNG nur bei ca. 60% liegt, sind lange Gas-Pipelines effizienter als der Transport von Kohle über große Entfernungen. Was den Endverbrauch anbetrifft, kann SNG – da es sich um einen sauberen, gasförmigen Brennstoff handelt – in einer Vielzahl fortschrittlicher Energiesysteme, Technologien und Anlagen, wie dezentrale Energie und Kraft-Wärme-Kopplung, für effizientere Anwendungen eingesetzt werden. Auf diese Weise kann die gesamte industrielle Wertschöpfungskette aus der größeren Gesamtenergieeffizienz und der Verringerung von CO₂-Emissionen Nutzen ziehen. Dennoch besteht das Hauptproblem im Zusammenhang mit dem Ausstoß und der Behandlung von CO₂ fort, das bei der Umwandlung von Kohle in SNG entsteht. In ähnlicher Weise wie in dem Beispiel mit der Methanolanlage beschrieben, könnte die pro Kohleeinheit erzeugte SNG-Menge vervielfacht und die CO₂-Emissionen könnten somit erheblich reduziert werden, wenn Windkraft für die Erzeugung von Sauerstoff und Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser eingesetzt wird.

Bei einer Betrachtung des Energiesystems insgesamt wäre es diese Art der Synergie wert, größere Forschungsanstrengungen zur Lösung der damit verbundenen wichtigen technischen Fragen zu unternehmen. Die Versuchsphase sollte sobald wie möglich eingeleitet werden, gefolgt von einer Förderung der Erprobung und des Ausbaus, um die Endkosten für Energieversorgungssicherheit, Energieeffizienz und das Erreichen umweltrelevanter Zielsetzungen zu minimieren.

Reduzierung der CO₂-Emissionen aus der Coal-to-Chemicals Industrie

China sollte unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Lage seinen eigenen Weg gehen und darüber nachdenken, wie die CO₂-Emissionen des Landes von nun an phasenweise reduziert werden können.

tial technical questions. Testing should take place as soon as possible, and from there, demonstration and deployment should be promoted to minimize the end cost of meeting energy security, energy efficiency, and environmental objectives.

CO₂ Emission Reductions from the Coal-to-Chemicals Industry

China should pave its own way according to the country's actual situation and reconsider how to reduce its CO₂ emissions in phases from this point forward. China is currently making great efforts to develop the coal-to-chemicals sector (e. g., methanol, dimethyl ether, methanol-to-olefins [MTO], methanol-to-propylene [MTP], direct coal liquefaction, and indirect coal liquefaction). The CO₂ released during these processes is already highly concentrated and pressurized and today most of this capture-ready CO₂ is released directly into the atmosphere. China emits more than 40 mt of CO₂ from methanol production alone. Therefore, reducing CO₂ emissions in China should begin with the coal-to-chemicals sector. We believe China should establish supportive policies such as carbon taxes and subsidies, and gain experience in CO₂ capture from this process (chemical and physical applications, transportation, storage, etc.). The knowledge gained from studying CO₂ emissions reductions in China's coal-to-chemicals sector could be directly applied to polygeneration systems.

Conclusions

Considering the future of cleaner energy in China, coal-fueled polygeneration as a product should be demonstrated, with gradual advancement towards large-scale development, after which CCUS should be implemented according to CO₂ reduction requirements.

As explained, collecting CO₂ from conventional power plant flue gas requires a tremendous amount of energy resources and investment. We believe China must also conduct research and small-scale demos in this area, but further observation is needed before large-scale commercial implementation.

Coal will remain a driving force in China's future energy mix. It is difficult to find suitable alternatives. Through the gasification of coal (or petroleum coke) and subsequent chemical synthesis, the polygeneration of electricity, liquid fuels, chemicals for products, heating, syngas, etc., can be achieved. In addition, synergistic integration of coal with renewable energy can help to meet overall energy requirements, alleviate liquid fuel shortages, and reduce coal combustion emissions and other energy-related issues simultaneously. From a technical perspective, polygeneration has been demonstrated, including the economic benefits and environmental capabilities, and thus carries great strategic significance for China and the world.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Ministry of Land and Resources (2011): Dynamic evaluation of national oil and gas resources 2010. (In Chinese)
- (2) Meinshausen, M., et al.: Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature*, 458 (7242), 2009, p. 1158–1162.
- (3) Ni, W., Li, Z.: Polygeneration energy systems based on coal gasification. [Monograph]. 2011, Tsinghua University Press.

China unternimmt gegenwärtig große Anstrengungen für die Entwicklung seines kohlechemischen Sektors, z.B. Methanol, Dimethylether, Methanol-/Olefin-Umwandlung (MTO), Methanol-/Propylen-Umwandlung (MTP), direkte und indirekte Kohleverflüssigung. Das bei diesen Prozessen freigesetzte CO₂ ist bereits hoch konzentriert und verdichtet und der größte Teil dieses zur Abscheidung bereiten Kohlendioxids wird direkt in die Atmosphäre eingeleitet. China emittiert mehr als 40 Mio. t CO₂ allein aus der Methanolproduktion. Aus diesem Grund sollte die Verringerung der CO₂-Emissionen in China beim kohlechemischen Sektor beginnen. Wir vertreten die Auffassung, dass China unterstützende Strategien wie Kohlenstoffsteuern und Subventionen verfolgen und Erfahrungen mit der CO₂-Abscheidung sammeln sollte (chemische und physikalische Anwendungen, Transport, Speicherung, usw.). Die im Zuge der Untersuchungen zur Verringerung von CO₂-Emissionen in Chinas Coal-to-Chemical-Industrie gewonnenen Erkenntnisse könnten unmittelbar auf Systeme der polyvalenten Energieerzeugung angewandt werden.

Schlussbetrachtungen

Was die Zukunft der sauberen Energie in China angeht, sollte die Technologie der kohlebasierten Polygeneration als Produkt etabliert werden, gefolgt von einer allmählichen Weiterentwicklung im großen Stil und anschließender Umsetzung der CCUS-Technologie in Übereinstimmung mit den Erfordernissen der CO₂-Reduzierung.

Wie bereits erläutert, erfordert die Abscheidung von CO₂ aus den Rauchgasen konventioneller Kraftwerke den Einsatz enormer Energieressourcen und Investitionen. Wir sind der Meinung, dass China auch auf diesem Gebiet forschen und Demoprojekte in kleinerem Umfang starten muss; dennoch ist die Entwicklung weiter zu beobachten, bevor eine kommerzielle Umsetzung in großem Stil erfolgen kann.

Die Kohle wird ihren Platz als treibende Kraft in Chinas zukünftigem Energiemix behaupten. Geeignete Alternativen zu finden, ist schwierig. Durch die Vergasung von Kohle (oder Petrolkoks) und nachfolgende chemische Synthese kann die Polygeneration von Elektrizität, Flüssigbrennstoffen, Chemikalien für Produkte, Wärme, Synthesegas usw. realisiert werden. Des Weiteren kann die synergetische Verzahnung von Kohle mit erneuerbaren Energien dazu beitragen, übergreifende Energieanforderungen zu erfüllen, die Verknappung von Flüssigbrennstoffen abzumildern und Emissionen aus der Kohleverbrennung zu reduzieren sowie gleichzeitig andere energierelevante Fragen zu lösen. Aus technischer Sicht hat sich die Polygeneration einschließlich ihrer wirtschaftlichen Vorteile und umweltrelevanten Eigenschaften als gangbarer Weg erwiesen und ist deshalb von großer strategischer Bedeutung für China und die Welt.

Authors / Autoren

Prof. Ni Weidou,
Chinese Academy of Engineering, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Tsinghua/China
Wang Minghua,
Manager, Shenhua Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Shenhua/China
Ph. D. Cand. Song Shizhong,
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Tsinghua/China