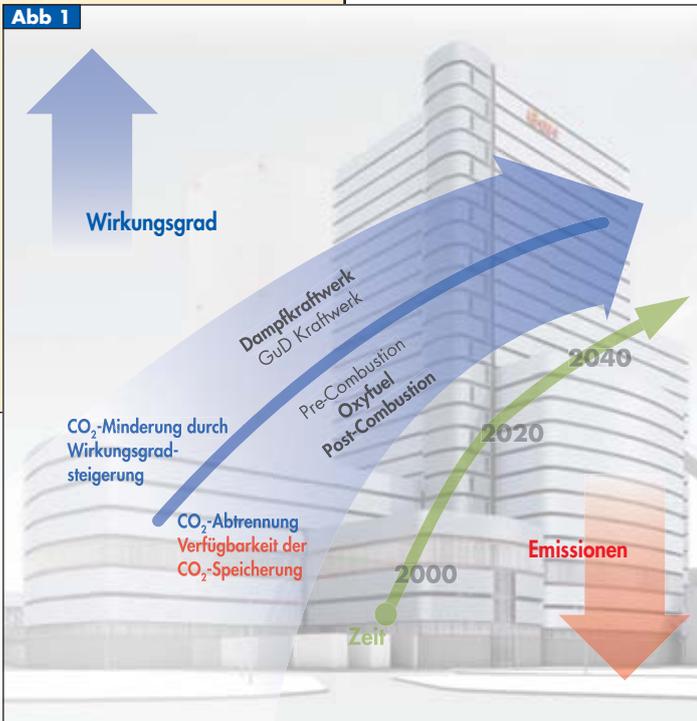




Kraftwerke mit Kohlenverbrennung

Abb 1



- ▶ Die Verstromung von Kohlen erfolgt nahezu ausschließlich über den sehr zuverlässigen Dampfkraftprozess
- ▶ Für höhere Wirkungsgrade „klassischer“ Kraftwerke sind 700 °C-Technik und Braunkohletrocknung Erfolg versprechend
- ▶ Durch höhere Wirkungsgrade sind in Deutschland Kohlenkraftwerke mit mehr als 20% geringeren CO₂-Emissionen möglich
- ▶ Verfahren zur CO₂-Abtrennung können diese Bilanz noch wesentlich verbessern

Im Vordergrund: Prozesse der Zukunft in der Kraftwerkstechnik.
Im Hintergrund: Modell des Steinkohlenkraftwerks „Datteln 4“

Bis zum Jahr 2020 werden in Deutschland voraussichtlich neue Kraftwerke in einer Größenordnung von 40.000 MW errichtet. Grund ist die Altersstruktur des deutschen Kraftwerksparks und die Stilllegung der Kernkraftwerke. Eine derart umfangreiche Modernisierungsphase der Kraftwerkslandschaft bietet eine enorme Chance, durch effiziente Kraftwerke mit niedrigen spezifischen Schadstoffemissionen gleichzeitig technische, ökonomische und ökologische Verbesserungen zu erreichen.

Bislang liefern Braun- und Steinkohlenkraftwerke fast die Hälfte des deutschen Stroms. Der Energieträger Kohle wird, trotz der mit seiner Nutzung verbundenen CO₂-Emissionen, aus Gründen der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit mittelfristig einen großen Anteil an der Stromerzeugung behalten. Hierbei gilt es, die Effizienz über eine optimierte Prozessführung, höhere Parameter im Dampfturbinen-Prozess sowie – bei Braunkohle – durch eine vorgeschaltete Trocknung zu steigern und so die Emissionen zu reduzieren. Das derzeit in Bau befindliche Steinkohlenkraftwerk „Datteln 4“ wird einen Nettowirkungsgrad von fast 46% erreichen, während der Durch-

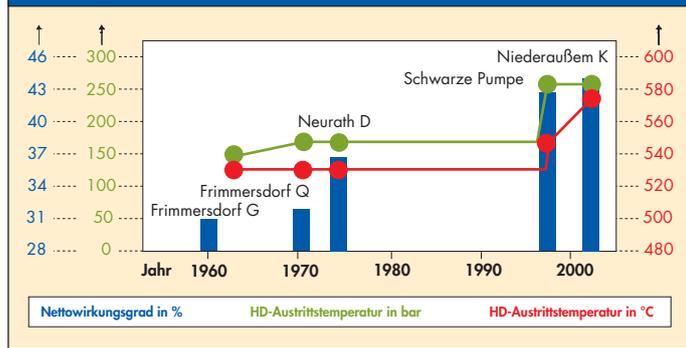
schnitt der deutschen Steinkohlenkraftwerke bei 38% liegt. Die spezifischen CO₂-Emissionen verringern sich so um ca. 17%. Bei der Braunkohle sind durch die Trocknung mit Niedertemperatur-Wärme noch bis zu 5%-Punkte Wirkungsgradsteigerung möglich. Für die Zukunft werden für Kraftwerke sowohl auf Stein- als auch auf Braunkohlenbasis Wirkungsgrade von über 50% erwartet.

Für die weitere CO₂-Emissionsminderung werden Verfahren gesucht, durch die CO₂ aus dem Rauchgas abgeschieden und klimaneutral gelagert werden kann. Als vielversprechende Optionen zur CO₂-Abscheidung nach Verbrennungsprozessen haben sich der Post-Combustion Capture Prozess und der Oxyfuel-Prozess herausgestellt. Dabei ergibt sich je nach Verfahren eine Wirkungsgradeinbuße von heute 9 bis 13%-Punkten, welche voraussichtlich auf 7 bis 11% verringert werden kann.

Die im Rahmen der Energieforschung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) verfolgte Strategielinie der Entwicklung effizienter Kraftwerkskonzepte ist eine wichtige Voraussetzung für die zweite Strategielinie der Abtrennung und Lagerung der CO₂-Emissionen von Kraftwerken.

Entwicklungen beim Dampfkraftwerk

Abb 2: Entwicklung von Wirkungsgrad und Frischdampfparametern bei Braunkohlekraftwerken in Deutschland



Die Nutzung von Kohlen zur Stromerzeugung erfolgt in Deutschland ausschließlich in Dampfkraftwerken. Die damit erreichbare hohe Verfügbarkeit und die Potenziale zur Effizienzsteigerung führen dazu, dass der Dampfkraft-Prozess auch für die CO₂-Emissionsminderung durch Wirkungsgradverbesserung nahezu ausschließlich herangezogen wird. **Abb 2** zeigt beispielhaft die Entwicklung der Wirkungsgrade bei Braunkohleblöcken in Deutschland. Die Steigerung des Wirkungsgrades von „Neurath D“ zu dem etwa 30 Jahre später gebauten „Niederaußem K“ ist dabei nur zu ca. 1/6 auf die Anhebung der Dampfparameter zurückzuführen. Die übrigen 5/6 waren bedingt durch Prozessverbesserungen und Verringerung des Eigenbedarfs. Das Potenzial dieser Maßnahmen ist nunmehr weitgehend ausgereizt, sodass für eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades im Wesentlichen die Anhebung der Dampfparameter (Temperatur, Druck) – und bei Braunkohle zusätzlich die Braunkohletrocknung mit Niedertemperatur-Wärme – übrig bleibt.

600 °C-Technologie

Die 600 °C-Technologie ist in Deutschland heute Stand der Technik und wird in allen aktuellen Neubauprojekten verfolgt. In einer Studie für ein Steinkohlen gefeuertes „Referenzkraftwerk NRW“ wurden für diese Technologie mögliche Auslegungsvarianten und deren Wirtschaftlichkeit untersucht. Hierbei erreichte die wirtschaftlichste Variante mit

Frischdampfparametern von 600 °C und 285 bar einen Nettowirkungsgrad von 45,9%. Die in der Studie ermittelten Frischdampfparameter sowie Komponenten und Materialien sind grundlegend für den Neubau des Steinkohlenkraftwerks „Datteln 4“, dem größten Steinkohlen-Monoblock in Deutschland mit einer Bruttoleistung von 1.100 MW. Die neuen Steinkohlenblöcke in Hamburg-Moorburg werden – bei ähnlichen Dampfparametern – mit Hilfe einer Flusswasserkühlung einen Wirkungsgrad von 46,5% erreichen.

Ein Braunkohle-Neubauprojekt auf Basis der 600 °C-Technologie sind die Blöcke BoA 2/3 (Braunkohlekraftwerk mit optimierter Anlagentechnik – BoA) in Neurath, in denen – aufbauend auf der BoA 1-Technologie in Niederaußem – die Dampfparameter weiter gesteigert werden. Im Gegensatz zur BoA 1 wird allerdings auf wartungs- und investitionsaufwendige Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung verzichtet. Dennoch soll mit der Anhebung der Frischdampfparameter auf 600 °C und 272 bar ein Nettowirkungsgrad von über 43% erreicht werden.

Braunkohletrocknung

Auch eine Braunkohletrocknung vor der Verbrennung bietet ein weiteres erhebliches Optimierungspotenzial. Dabei wird für die Trocknung der Rohbraunkohle nicht – wie in **Abb 4 links** dargestellt – heißes Rauchgas und damit hochwertiger Brennstoff verwendet, sondern Niedertemperatur-Wärme.

Abb 3: Rotglühende Frischdampfleitung der Komponententestanlage im Kraftwerk Scholven



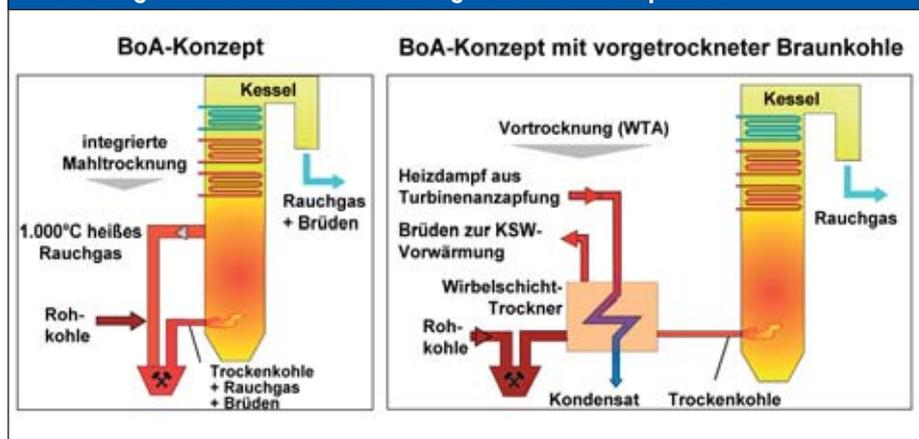
Abb 4 rechts zeigt, wie dies mit Anzapfdampf aus der Dampfturbine erfolgen soll. Der aus der Kohle angetriebene Wasserdampf (Brüden) enthält Kondensationswärme. Diese kann zusätzlich für die Kessel-Speisewasser (KSW)-Vorwärmung oder die Luftvorwärmung zurückgewonnen werden. Durch die Kombination der Effekte kann bei Rohbraunkohle mit einem Wasseranteil von 50% ein Wirkungsgradgewinn von bis zu 5%-Punkten erreicht werden. Zur Erprobung dieser Technologie ist an der BoA 1 in Niederaußem eine Wirbelschichttrocknungsanlage (WTA) aufgebaut worden, die 20 bis 30% der maximalen Feuerungswärmeleistung bereitstellen soll.

700 °C-Technologie

Die Frischdampfparameter auf über 600 °C anzuheben, ist mit den bisherigen Werkstoffen im Hochtemperaturbereich von Dampfkraftwerken nicht möglich. Spezialwerkstoffe mit hohem Nickelanteil (Nickel-Basis-Legierungen) jedoch erlauben eine Anhebung der Frischdampfparameter unter Beibehaltung akzeptabler Festigkeitswerte. Diese Legierungen lassen eine Steigerung der Temperatur auf 700 °C und des Drucks auf 350 bar zu. Dafür müssen die im Bereich hoher Materialtemperaturen liegenden Sammler, Rohrleitungen und Überhitzerheizflächen aus Ni-Basis-Werkstoffen gefertigt werden. Auch die Werkstoffe einiger Teile der Dampfturbine, wie Ventile und die ersten Schaufelreihen, müssen an die gesteigerten Dampfparameter angepasst werden. Im Rahmen des Projekts COMTES700 ist am Kraftwerk Scholven eine Anlage zur Untersuchung der Werkstoffe dieser o. g. Komponenten unter realen Bedingungen aufgebaut worden (**Abb 3**). Durch dieses Projekt werden außerdem Herstellungsverfahren und Montagefirmen für ein 700 °C-Kraftwerk qualifiziert.

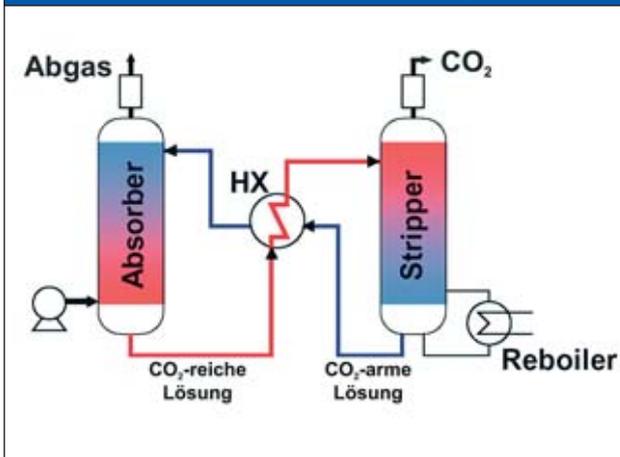
Neben den Materialuntersuchungen ist bereits eine Pre-Engineering Studie für ein Demonstrationskraftwerk in Arbeit. 2014 soll das weltweit erste 700 °C-Kraftwerk mit einem prognostizierten Wirkungsgrad von über 50% in Betrieb gehen.

Abb 4: Integration der Braunkohletrocknung in den Kraftwerksprozess



► CO₂-Abtrennung und Lagerung

Abb 5: Schema einer nass-chemischen Rauchgaswäsche



Neben der Möglichkeit die spezifischen CO₂-Emissionen durch effizientere Kraftwerke zu senken, sind auch Prozesse zur Abscheidung des CO₂ mit anschließender klimaneutraler Lagerung denkbar. Bei Verbrennungsprozessen existieren dafür prinzipiell zwei Verfahren: Post-Combustion und Oxyfuel. Beide Pfade profitieren von der hohen Zuverlässigkeit und der langjährigen Betriebserfahrung mit konventionellen Dampfkraftwerken.

Post-Combustion Capture

Bei einer der Verbrennung nachgeschalteten Abtrennung des CO₂ (Post-Combustion Capture, PCC) aus dem Rauchgas kohlengefeuerter Kraftwerke liegt das CO₂ naturgemäß bei einem niedrigen Partialdruck im Rauchgas vor (10-15 Vol.-%). Somit müssen große Rauchgasvolumenströme bei geringem Druck behandelt werden, was unweigerlich ein großes Bauvolumen der Anlage zur Folge hat. Mittelfristig ist PCC nur bei Einsatz eines chemischen Absorptionsmittels wirtschaftlich.

Abb 5 zeigt den typischen Aufbau eines Prozesses für die CO₂-Abtrennung mit einer dem Kraftwerk nachgeschalteten Rauchgaswäsche (nass-chemische Absorption). Das Rauchgas strömt aufwärts durch den Absorber, während das unbeladene (arme) Lösungsmittel im Gegenstrom das CO₂ absorbiert. Die Regeneration des mit CO₂ beladenen Lösungsmittels (zumeist wässrige Aminlösung, z. B. Monoethanolamin, MEA) im Sumpfordampfer des Strippers (Reboiler) erfordert die Auskopplung von ca. 60% des Niederdruckdampfes aus dem Kraftwerksprozess. Gemeinsam mit dem erhöhten Eigenbedarf in den Teilprozessen für die CO₂-Abtrennung und -Verflüssigung reduziert sich dadurch der Nettowirkungsgrad des Gesamtkraftwerks um ca. 12%-Punkte.

Obwohl Pre-Combustion (Kohlenvergasung, IGCC) und Oxyfuel Prozesse mit CO₂-Abtrennung zu niedrigeren Wirkungsgradeinbußen führen, bieten PCC Technologien den Vorteil einer fortgeschrittenen technologischen Reife und die Möglichkeit einer

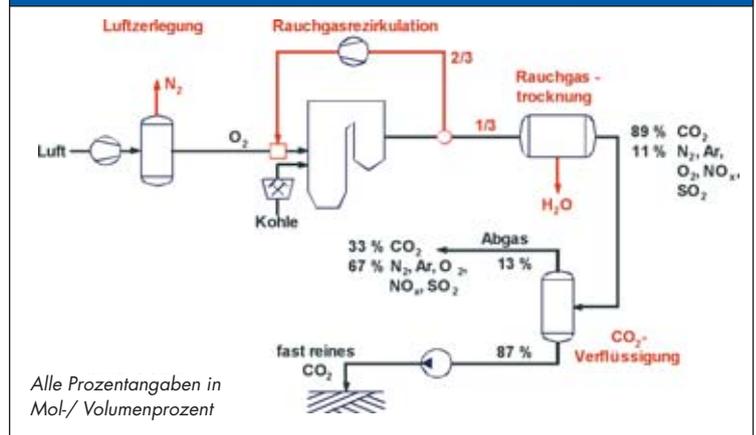
Nachrüstung bestehender Kraftwerke. Die bereits existierenden Prozesse (z. B. Erdgasreinigung) müssen jedoch an die Behandlung von Rauchgasen aus der Kohlenverbrennung angepasst werden. Dazu zählen der hohe energetische Aufwand für die Regeneration und die Degradation des Lösungsmittels durch SO₂ und O₂. Der Kraftwerksprozess bleibt bei der Anwendung von PCC Technologien hingegen größtenteils unberührt, was sich positiv auf die Verfügbarkeit des Gesamtprozesses auswirkt. Es wird erwartet, dass die Wirkungsgradeinbuße durch die Entwicklung neuer Lösungsmittel und innovativer Prozessschaltungen auf unter 10% reduziert werden kann.

Oxyfuel

Beim Oxyfuel-Prozess kann das CO₂ mit geringerem Energieeinsatz und damit niedrigeren Wirkungsgradverlusten abgeschieden werden, da die CO₂-Konzentration im Rauchgas vor der Abtrennung auf ca. 89 Vol.-% (trocken) angehoben wird.

Das Konzept des Oxyfuel-Prozesses (Abb 6) ist, der Luft vor dem Kessel mittels einer Luftzerlegungsanlage den Stickstoff zu entziehen, wodurch der Verbrennung nahezu reiner Sauerstoff zugeführt wird. Ohne den Stickstoff fehlt aber auch eine wesentliche Wärmesenke. Um in der Brennkammer ein

Abb 6: Prozessschema des Oxyfuel Prozesses mit den wesentlichen Neuerungen Luftzerlegung, Rezirkulation und Rauchgasaufbereitung



Alle Prozentangaben in Mol-/ Volumenprozent

der Verbrennung mit Luft ähnliches Temperaturniveau zu erhalten, müssen etwa zwei Drittel der Rauchgase nach ihrer Abkühlung zur Feuerung zurückgeführt werden. Das den Dampferzeuger verlassende Rauchgas hat nach der Trocknung einen CO₂-Gehalt von ungefähr 89 Vol.-%. Der restliche Anteil besteht im Wesentlichen aus überschüssigem Sauerstoff, Argon, Stickstoff, SO₂ und NO_x. Diese Verunreinigungen stellen das hauptsächliche Problem des Oxyfuel-Prozesses dar, da ein Teil bei der Verflüssigung (d. h. Kondensation des CO₂-Anteils des Rauchgases) mit in die flüssige Phase übergeht und zu Problemen bei Transport und Lagerung führen kann. Somit hängt der Erfolg des Oxyfuel-Prozesses entscheidend von den einzuhaltenden Reinheiten und den Vorgaben der Lagerstätte ab.

Am Kraftwerk „Schwarze Pumpe“ wird eine Pilotanlage zur Untersuchung des Oxyfuel-Prozesses errichtet, parallel dazu betriebene Untersuchungen ermitteln die Auswirkungen auf ein Kraftwerk im vollen Maßstab. Durch den Eigenbedarf der Luftzerlegungsanlage und der CO₂-Verflüssigung reduziert sich der Nettowirkungsgrad des Kraftwerkes um ca. 10%-Punkte. Das Ziel ist es, diese Wirkungsgradminderung auf ca. 8%-Punkte zu reduzieren.

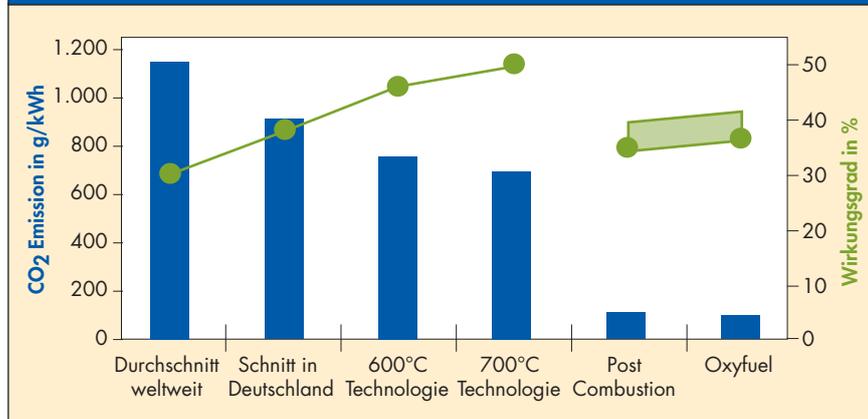
Abb 7: Die im Bau befindliche Oxyfuel Pilotanlage am Kraftwerk Schwarze Pumpe



Perspektiven

Die klassische Kraftwerkstechnik mit ihrem wesentlichen Vertreter Dampfkraftwerksprozess bietet noch beträchtliches Potenzial zur Wirkungsgradsteigerung. Effiziente Kraftwerke können auch unabhängig vom CO₂-Handel wirtschaftlich betrieben werden, da ein hoher Wirkungsgrad neben den Emissionen auch den Brennstoffverbrauch senken wird. Gerade im Hinblick auf den Neubaubedarf des deutschen Kraftwerksparks bis 2020 ist dies unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten von großer Bedeutung.

Abb 8: Entwicklung von Wirkungsgrad und CO₂-Emissionen von Steinkohlenkraftwerken



Trotz der niedrigsten spezifischen CO₂-Emissionen bei den fossilen Kraftwerksprozessen sind dem Erdgasanteil bei der Stromerzeugung im Interesse der Versorgungssicherheit Grenzen gesetzt. Daher werden Braun- und Steinkohlen als Brennstoff für den Kraftwerksbereich in Deutschland auch zukünftig eine große Rolle spielen. Hierfür sind die 700 °C-Technologie und die Braunkohlevortrocknung aussichtsreiche Entwicklungslinien. Mit der 700 °C-Technologie kann bei Steinkohlenkraftwerken der spezifische CO₂-Ausstoß gegenüber dem deutschen Durchschnitt um über 20% und gegenüber dem weltweiten Durchschnitt um etwa 40% gesenkt werden.

Optimierte Dampfkraftwerke sind eine gute Ausgangsbasis für die auf ihnen aufbauenden Technologien zur CO₂-Abtrennung (CCS-Technologien), da alle Wirkungsgradsteigerungen auch diesen Technologien zugute kommen. Die Einführung der CCS Technologien senkt den Wirkungsgrad im Vergleich zur heute verfügbaren 600 °C-Technologie auf unter 40%, jedoch sind damit Kohlenkraftwerke mit spezifischen CO₂-Emissionen von unter 100 g/kWh möglich.

PROJEKTADRESSEN

Die vorgestellten Projekte sind Bestandteil des Förderkonzepts COORETEC.

Weitere Informationen, besonders der Bericht der COORETEC-Arbeitsgruppen „Forschungs- und Entwicklungskonzept für emissionsarme fossil befeuerte Kraftwerke“ (Forschungsbericht des BMWA Nr. 527), stehen unter www.cooretec.de zum Download ein.

Ansprechpartner für das Förderkonzept COORETEC:

- Institut für Energietechnik
Technische Universität
Hamburg-Harburg
Prof. Dr.-Ing. A. Kather
Denickestr. 15
21073 Hamburg

ERGÄNZENDE INFORMATIONEN

Literatur

- Die Broschüre „Leuchtturm COORETEC“ wird im Sommer 2007 als Forschungsbericht Nr. 566 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie erscheinen. (www.bmwi.de)

Zum Thema „Kraftwerke“ beim BINE Informationsdienst erhältlich:

- Projekt-Info „Kraftwerke mit Kohlenvergasung“ (9/2006)
- Basis-Info Nr 17 „Effiziente Kraftwerke“

Service

- Ergänzende Informationen wie Literatur, Adressen und Internet-Links sind beim BINE Informationsdienst erhältlich oder im Internet unter www.bine.info (Service/Infoplus) abrufbar

Abbildungsnachweis

- Abb. 1a, 2, 5, 6, 8: TU Hamburg-Harburg, Institut für Energietechnik
- Abb. 1b, 3: E.ON Energie
- Abb. 4: RWE Power
- Abb. 7: Vattenfall Power Europe

PROJEKTORGANISATION

Förderung

Bundesministerium für
Wirtschaft und Technologie (BMWi)
11019 Berlin

Projektträger Jülich (PtJ)
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Hubert Höwener
52425 Jülich

Förderkennzeichen

Wegen der Vielzahl der hier
vorgestellten Projekte wird
auf www.cooretec.de verwiesen

IMPRESSUM

ISSN

0937 – 8367

Herausgeber

FIZ Karlsruhe
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Nachdruck

Nachdruck des Textes nur zulässig bei
vollständiger Quellenangabe und gegen
Zusendung eines Belegexemplares;
Nachdruck der Abbildungen nur mit
Zustimmung der jeweils Berechtigten.

Autoren

Karl Mieske, Uwe Milles, Jochen Oexmann

BINE Informationsdienst Kompetenz in Energie

BINE informiert zu Energieeffizienz-
technologien und erneuerbaren Energien:

In kostenfreien Broschüren, unter
www.bine.info und per Newsletter zeigt
BINE, wie sich gute Forschungsideen in
der Praxis bewähren.

BINE ist ein vom Bundesministerium für
Wirtschaft und Technologie geförderter
Informationsdienst von FIZ Karlsruhe.

Kontakt

Fragen zu diesem **projektinfo?**

Wir helfen Ihnen weiter:

Tel.: 0228 92379-44

 **BINE**
Informationsdienst

FIZ Karlsruhe, Büro Bonn
Kaiserstraße 185 – 197
53113 Bonn

Tel.: 0228 92379-0
Fax: 0228 92379-29

bine@fiz-karlsruhe.de
www.bine.info