Michael Beckmann Antonio Hurtado

# KRAFTWERKSTECHNIK

– Sichere und nachhaltige Energieversorgung –

Band 2



Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Kraftwerkstechnik**
– Sichere und nachhaltige Energieversorgung – Band 2
Michael Beckmann, Antonio Hurtado.
– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010
ISBN 978-3-935317-57-3

ISBN 978-3-935317-57-3 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2010
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. Michael Beckmann und Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Erfassung und Layout: Dipl.-Kffr. Elke Czaplewski, Nicole Bäker, Janin Burbott
Petra Dittmann, Martina Ringgenberg, Andreas Schulz und Ginette Teske
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München
Foto auf dem Buchdeckel: Dipl.-Ing. Thomas Schmidt, Pirna

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

# Inhaltsverzeichnis

## Technik und Märkte – Entwicklungstendenzen

**Stand der Fusionstechnik**
Günther Hasinger ..... 3

**Strommix in der EU27**
**– Entwicklung der Stromerzeugung in Europa von 2007 bis 2030 –**
Thorsten Herdan, Gerd Krieger und Matthias Zelinger ..... 21

**Marktentwicklung für konventionelle Kraftwerke**
**aus der Sicht eines Anlagenbauers**
Klaus-Dieter Tigges ..... 39

**Entwicklungsperspektiven für konventionelle Kraftwerke**
**aus Sicht eines Energieversorgers**
Hubertus Altmann ..... 59

**Marktentwicklung für regenerative/dezentrale Energieversorgung**
**aus Sicht eines kommunalen Unternehmens**
Christof Regelmann, Frank Wustmann, Swen-Sören Börner
und Jürgen Maier ..... 65

## Pilot- und Neubauprojekte

**SNCR sprengt Leistungsgrenzen**
Karlheinz Huber, Zoltan Teuber und Thomas Reynolds ..... 73

**Versuchsergebnisse aus der Post Combustion Capture Pilotanlage**
**in Niederaußem**
Peter Moser, Sandra Schmidt, Georg Sieder, Hugo Garcia,
Torsten Stoffregen und Frank Rösler ..... 97

**Abnahme thermischer Kraftwerke nach VDI 2048**
**– am Beispiel verschiedener Kraftwerkstypen –**
Richard Kitzberger und Ralf-Roman Schmidt ..... 109

**Erfahrungen mit Lieferungen und Leistungen aus dem internationalen Umfeld beim Bau des Steinkohlekraftwerks Duisburg Walsum**
Andreas Dennewitz und Holger Larisch ..... 121

**Modernes Risiko- und Schadenmanagement bei Neubau- und Retrofitprojekten in der Kraftwerkstechnik**
Andreas Otter ..... 129

## CCS-Technologien

**Optimierung der Oxyfuel-Kraftwerkskonzepte mit der Sauerstoffbereitstellung durch Hochtemperaturmembranen**
Jewgeni Nazarko, Ernst Riensche, Ludger Blum und Detlef Stolten ..... 147

**OXYCOAL-AC – Rauchgasreinigung, Schadstoffgehalte und Betriebsverhalten der Versuchsanlage im Luft-, $O_2$/$CO_2$- und Rezirkulationsbetrieb**
Arno Kellermann, Martin Habermehl, Malte Förster und Reinhold Kneer ... 169

**Rauchgaskühler mit neuen Fluorkunststoffen für den Einsatz in Kraftwerken**
Peter Dittmann und Hugo Graepel ..... 179

**Möglichkeiten zur Prozessüberwachung und Detektion von Falschlufteinbrüchen in Oxyfuel-Kraftwerken**
Robert Preusche, Conrad Schulz, Holger Ecke, Uwe Burchhardt und Uwe Gampe ..... 187

**$CO_2$-Abscheidung und -Lagerung – Herausforderungen im Pumpendesign und -betrieb –**
Sabine Sulzer, Georg Mohr und Uwe Kirstein ..... 197

**Entwicklungsstand der Oxy-Verbrennungstechnologie**
Frank Kluger, Patrick Mönckert, Thomas Wild, Andreas Marquard und Armand A. Levasseur ..... 207

**Betriebserfahrungen aus zwei Jahren Testbetrieb der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall**
Uwe Burchhardt, Steffen Lysk, Daniel Kosel, Steffen Griebe, Helge Kass und Robert Preusche ..... 221

**Erste Ergebnisse der Verbrennungsversuche mit dem Hitachi DST-Brenner in Vattenfalls 30 $MW_{th}$-Pilotanlage in Schwarze Pumpe**
Sebastian Rehfeldt, Patrick Weckes, Christian Bergins, Klaus-Dieter Tigges, Jürgen Niesbach, Franz Peter Schiffer, Alfons Leisse, Christian Kuhr, Martin Ehmann und Steffen Lysk ..... 241

**CCS-Beschaffungsstrategien**
Stefan Plasa und Christian Wilckens ..... 255

**Untersuchung des Verbrennungsverhaltens eines nichtstöchiometrischen Oxycoal-Brenners**
Jan-Peter Bohn, Pedro Dias, Adrian Goanta, Maximilian Blume und Hartmut Spliethoff ..... 267

**Eine neue DeNOx-Technologie für ein Oxyfuel-Kraftwerk**
Roland Ritter, Nicole Schödel, Torsten Stoffregen und Florian Winkler ..... 283

**Varianten zur Auskopplung großer Prozessdampfmengen (CCS) im exergetischen Vergleich**
Norbert Pieper und Michael Wechsung ..... 301

**Energetischer Vergleich chemischer Lösungsmittel für die Post-Combustion $CO_2$-Abtrennung im Gesamtkraftwerksprozess**
Jochen Oexmann, Christoph Hasenbein und Alfons Kather ..... 315

**$CO_2$-Rückhaltung aus Rauchgasen kohlebefeuerter Kraftwerke**
Elizabeth Heischkamp, Peter Behr, Gerd Oeljeklaus und Klaus Görner ..... 327

**Vergleich von Waschlösungen für die $CO_2$-Abtrennung aus Rauchgasen mit einem Sprühabsorber**
Kevin Brechtel, Anke Schäffer, Paula Galindo Cifre, Oliver Seyboth und Günter Scheffknecht ..... 339

## Gas- und Dampfturbinen

**Zukunftsperspektiven für die Hochtemperatur-Gasturbine**
Konrad Vogeler ..... 353

**Nutzung alternativer Brennstoffe in Gasturbinen**
**– Betriebserfahrungen und Ausblick –**
Uwe Lenk, Frank Richter und Ralph Schneider ..... 367

**Dampfturbinentechnik in Neubauprojekten**
**der Vattenfall Europe Generation AG**
Hans Mandel, Marco Redieß, Udo Klauke und Alexander Tremmel ..... 381

**Gasturbinentechnik für wärmelasttolerante KWK-Anlagen**
**und Nutzung industrieller Abwärme**
Karl Hoffmann, Martin Rhein, Uwe Gampe, Guntram Buchheim,
Lutz Fricke und Roland Deranek ..... 393

## Kohletrocknung

**Trockenbraunkohleproduktion unter Hochdruck**
**– Betriebserfahrungen der Versuchsanlage zur**
**druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) –**
Thomas Porsche, Lutzian Thannhäuser, Benjamin Jentzsch,
Thomas Rauer, Jörg Martin und Olaf Höhne ..... 407

**Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT)**
**von Braunkohlen**
**– Neueste Betriebsergebnisse von der BTU-Versuchsanlage –**
Matthias Merzsch, Rico Silbermann, Stefan Lechner
und Hans Joachim Krautz ..... 419

**Stand der Entwicklung der Wirbelschicht-Trocknung mit interner**
**Abwärmenutzung (WTA) für Braunkohle bei der RWE Power AG**
Hans-Joachim Klutz, Claus Moser und Ditmar Block ..... 427

## Verschlackung und Korrosion

**Einsatz innovativer Rußbläsersysteme zur effizienten Überhitzerreinigung mit Wasser**
Dimitri Mousko, Richard Zachay, Jörg Beer und Christian Mueller ..... 445

**Korrosion in Dampferzeugern mit schwierigen Brennstoffen**
Wolfgang Spiegel, Thomas Herzog, Gabi Magel, Wolfgang Müller und Werner Schmidl ..... 455

**Ascheablagerungsprobleme bei der Mitverbrennung von alternativen Brennstoffen in Kohlekraftwerken**
Tomasz Kupka und Roman Weber ..... 477

**Einsatz von Infrarot-Kameras zur Lokalisierung von Brennkammerverschmutzungen am BoA-Block des Kraftwerkes Niederaußem und erste Betriebserfahrungen**
Ralf Koschack, Stefan Fiehe und Peter Taj ..... 495

## Regenerative und dezentrale Energieversorgung

**Das Regionenmodell – Basis detaillierter Analysen von Energieversorgungskonzepten**
Tobias Schmid und Michael Beer ..... 507

**Zehn Jahre HKW Cottbus – Erfahrungen aus dem Betrieb einer braunkohlegefeuerten Druckwirbelschichtanlage**
Bernd Lipinski und Hans Joachim Krautz ..... 519

**Stroh zu Strom und Wärme**
Stefan Vodegel und Werner-Friedrich Staab ..... 531

**Dezentrales Energie- und Netzmanagement mit flexiblen Stromtarifen**
Bernhard Wille-Haussmann, Christof Wittwer und Christian Sauer ..... 539

**Technologien für Offshore-Windturbinen**
**– Anforderungen der Betreiber –**
Albert Kriener ..... 551

**Entwicklungslinien bei Wasser-Dampf-Kreisläufen**
**und Dampfturbinen für solarthermische Kraftwerke**
Klaus Behnke, Thomas Polklas, Mark André Schwarz,
Ilja Tuschy und Aiko Vogelsang ..... 563

## Kernenergetische Systeme

**Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung der Kernenergie**
Didier Haas ..... 575

**Geschlossener Brennstoffkreislauf**
**für eine zukünftige nachhaltige Kernenergienutzung**
Thomas Fanghänel, Jean-Paul Glatz und Joseph Somers ..... 583

**Experimentelle und analytische Untersuchungen**
**zu passiven Komponenten des KERENA™-Konzeptes**
**im Versuchsstand INKA**
Hans-Georg Willschütz, Frank Diercks, Stephan Leyer,
Anne Krüssenberg, Frank Schäfer und Hristo Vesselinov Hristov ..... 599

**KERENA™ – ein fortschrittlicher Siedewasserreaktor der Generation 3+**
Stephan Leyer, Doris Pasler, Hans-Georg Willschütz,
Steffen Pankow und Frank Diercks ..... 607

**Die Verwendung von Thorium in Druckwasserreaktoren**
Emil Fridman ..... 613

**Akzeptanzfragen bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle**
Beate Kallenbach-Herbert ..... 625

**Künftige Kernenergienutzung**
**– Kerntechnische Ausbildung und Kompetenzerhalt in Deutschland –**
Antonio M. Hurtado ..... 637

## Prozesssimulation, Regelung und Messtechnik

**Onlinesysteme zur Zustandsüberwachung von Rohrleitungen und dickwandigen Bauteilen in Neuanlagen**
Joël Wagner ..... 649

**Wirbelschichtanlagen – moderne Regelung und Betriebserfahrungen**
Jürgen Morawa ..... 659

**Untersuchung des Einflusses von dicht gepackten Tauchheizflächen auf die Eigenschaften von Wirbelschichten mit numerischer Strömungssimulation**
Matthias Schreiber, Teklay Weldeabzgi Asegehegn und Hans Joachim Krautz ..... 679

**Simulation der Dynamik von Steinkohledampferzeugern beim Anfahren, im Lastbetrieb und bei Betriebsstörungen**
Michael Heim, Thomas Ferrand und Frank Kluger ..... 691

**Co-Verbrennung von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerksfeuerungen**
Hans-Joachim Gehrmann, Michael Nolte, Thomas Kolb, Helmut Seifert, Patrick Waibel, Jörg Matthes und Hubert Keller ..... 705

**Kamerabasierte Analyse und Regelung von Mehrstoffbrennern**
Jörg Matthes, Patrick Waibel, Hubert B. Keller, Hans-Joachim Gehrmann, Thomas Kolb und Helmut Seifert ..... 715

**Wärmestromdichtemessung zur Belagsbestimmung**
Sebastian Grahl und Michael Beckmann ..... 727

**Entwicklung eines flexiblen Feuerungssystems zur Verbrennung von Schwachgasen in Mikrogasturbinen-Brennkammern**
Jörg Leicher, Anne Giese, Viktor Scherer und Tim Schulzke ..... 743

**Wirkungsgradsteigerung von Kohlekraftwerken mit Hilfe von CFD-Simulationen der Luft- und Rauchgaskanäle in bestehenden Anlagen**
Daniel Depta und Nils Oldhafer ..... 753

**Bildgebende Messverfahren und CFD-Simulation für die Energieverfahrenstechnik**
Uwe Hampel, Dirk Lucas, Christophe Vallée, Thomas Höhne, Matthias Beyer, Frank Fischer und Frank-Peter Weiß ..... 769

**Autorenverzeichnis** ..... 789

**Inserentenverzeichnis** ..... 829

**Schlagwortverzeichnis** ..... 835

# Technik und Märkte – Entwicklungstendenzen

# Stand der Fusionstechnik

Günther Hasinger

1. Das Energie-Dilemma ..... 3

2. Möglicher Beitrag verschiedener Energien zum zukünftigen Strombedarf ..... 5

3. Fusionsreaktionen ..... 8

4. Magnetischer Einschluss ..... 11

5. Der Weg zu einem Fusionskraftwerk ..... 17

6. Quellen ..... 20

## 1. Das Energie-Dilemma

Der mittlere Pro-Kopf-Verbrauch der Welt liegt derzeit bei etwa 2.200 Watt (W) Primärenergie pro Person. Das ist zu vergleichen mit der Leistung von etwa 200 W, die ein Mensch für das reine Überleben benötigt (denn jeder strahlt bereits etwa 100 W als Körperwärme ab). Dabei gibt es einen deutlichen Zusammenhang zwischen Reichtum und Energieverbrauch. Die große Mehrheit der Weltbevölkerung in den Entwicklungsländern muss mit einem Energieverbrauch von weit weniger als der Hälfte des heutigen Mittelwertes auskommen, während die reichen, entwickelten Länder etwa zwei bis drei Mal so viel verbrauchen, die USA und Kanada sogar etwa fünf Mal so viel wie der Durchschnitt. Bereits diese Relationen zeigen, dass zukünftige Einsparpotentiale durch Effizienzsteigerung und geringeren Energieverbrauch zwar sehr wichtig sind, jedoch das globale Energieproblem nicht lösen können: Würde man die gesamte entwickelte Welt mit etwa 500 Millionen Menschen komplett *abschalten*, würde der Anstieg des Energieverbrauches in den bevölkerungsreichen Entwicklungsländern (mehr als sechs Milliarden Menschen) dieses Einsparpotential schnell wieder kompensieren.

Neue Technologien zur Bereitstellung und zur Einsparung von Energie müssen deshalb in den Industrieländern entwickelt werden, um der gesamten Welt in Zukunft eine nachhaltige Energieversorgung zu ermöglichen. Es wird sich jedoch selbst bei größten Anstrengungen nicht vermeiden lassen, dass der zukünftige Pro-Kopf-Verbrauch ansteigt. Gelingen muss es jedoch, den Verbrauch langfristig auf 3 kW pro Person zu begrenzen; dafür müssen erhebliche Effizienzsteigerungen und Einsparpotentiale genutzt werden. Ein wichtiger Zusammenhang besteht auch zwischen dem mittleren Energieverbrauch und der menschlichen Lebenserwartung: In Ländern mit weniger als 3 kW/Kopf ist die mittlere Lebenserwartung geringer als siebzig Jahre, in Ländern mit höherem Energieverbrauch entsprechend länger. Auch deshalb scheint ein Wert von 3 kW/Kopf für eine allen Interessen nachkommende Entwicklung notwendig.

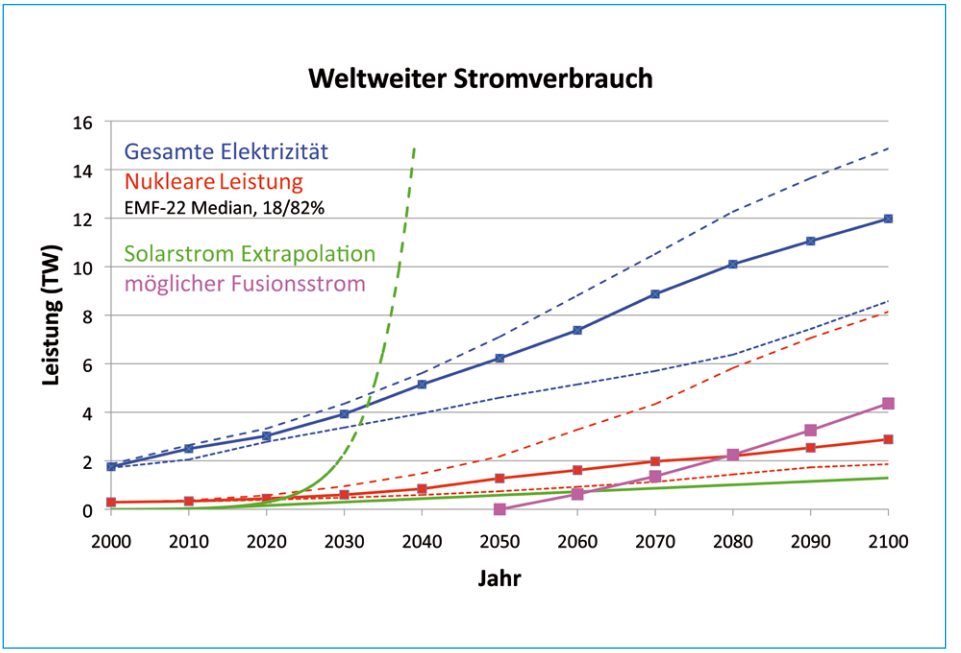



Abb. 1: Vorhergesagter Anstieg des globalen Strombedarfes bis zum Jahr 2100 und mögliche Beiträge verschiedener Energieformen (siehe Text). Die durchgezogenen Linien stellen Median-Werte über etwa hundert verschiedene Energieszenarien der EMF-22-Datenbank dar, die gestrichelten Linien entsprechen jeweils 18 % bzw. 82 % der Modelle. Für den möglichen solaren Beitrag (grüne Kurven) ist ein Modell mit exponentiellem Wachstum und ein Modell mit saturiertem Wachstum dargestellt. Für die Fusion wurde ab 2050 ein jährliches Wachstum von 1,2 % des globalen Elektrizitätsverbrauches angenommen.

Die besondere Dramatik der zukünftigen Energieversorgung ergibt sich aus dem weiteren Wachstum der Weltbevölkerung. Im 20. Jahrhundert ist die Menschheit um den Faktor drei gewachsen und liegt jetzt bei etwa 6,8 Milliarden. Die Vereinten Nationen [1] geben regelmäßig Vorhersagen über die Entwicklung der Weltbevölkerung heraus. Daraus erkennt man, dass in Europa das Bevölkerungswachstum bereits stagniert und in Nord- und Süd-Amerika deutlich gebremst ist, während die Bevölkerung in den Entwicklungsländern weiter stark ansteigt, vor allem in Asien und noch schneller in Afrika. Im 21. Jahrhundert wird sich das Bevölkerungswachstum im Vergleich zum vorigen Jahrhundert jedenfalls deutlich abschwächen. Wo sich die Weltbevölkerung letztendlich einpendelt, hängt vor allem von der Entwicklungsgeschwindigkeit in den Ländern mit dem größten Bevölkerungswachstum ab. Die Erwartung für die Weltbevölkerung im Jahr 2050 liegt bei etwa neun Milliarden Menschen mit einer Schwankungsbreite von etwa 1,5 Milliarden. Die Extrapolation in das Jahr 2100 ist natürlich sehr unsicher. Optimistische Schätzungen gehen davon aus, dass der Scheitelpunkt der Kurve dann überschritten sein wird und sich die Bevölkerung wieder reduziert, die

pessimistischen Schätzungen sagen sogar eine Steigerung auf etwa 14 Milliarden vorher. Für die Abschätzung des Energiebedarfes der Zukunft wird im Folgenden eine Weltbevölkerung von 10 Milliarden im Jahr 2100 angenommen.

Für eine nachhaltige Energieversorgung im Jahr 2100 müssen also zehn Milliarden Menschen mit 3 kW pro Kopf versorgt werden, das ist ein Primärenergiebedarf von 30 Terawatt (1 TW = $10^{12}$ W). Im Vergleich zum heutigen Energieverbrauch ist das eine Verdoppelung. Die meisten Energieszenarien für die Zukunft gehen jedoch von einem wesentlich stärkeren Wachstum bei der Elektrizität aus. Der globale Stromverbrauch liegt heute bei etwa 2,4 TW, also 16 % des Primärenergieverbrauches. Betrachtet man eine ganze Schar von etwa hundert zukünftigen Energieszenarien, die von fünfzehn verschiedenen internationalen Wissenschaftlergruppen mit stark unterschiedlichen Annahmen erstellt wurden und in dem Datensatz *Energy Modelling Forum 22* (EMF-22) veröffentlicht wurden [2], so stellt man fest, dass der zukünftige globale Stromverbrauch unabhängig von den detaillierten Annahmen im Rahmen relativ geringer Schwankungsbreiten in allen Modellen etwa gleich vorhergesagt wird (Abbildung 1). Der Bedarf an Elektrizität wächst demnach in diesem Jahrhundert um etwa einen Faktor sechs auf einen Wert von etwa 12 TW und damit 40 % des Primärenergiebedarfes an (siehe auch [3]).

## 2. Möglicher Beitrag verschiedener Energien zum zukünftigen Strombedarf

### Regenerative Energien

Die Stromerzeugung der regenerativen Energien, insbesondere Wind- und Solarenergie, zeigt in den letzten Jahren beeindruckende globale Wachstumsraten. Sie werden in Zukunft sicher zu den wichtigsten Elektrizitätsquellen gehören. Allerdings kann der Beitrag der regenerativen Energien zur globalen Stromversorgung – aus verschiedenen Gründen – sehr wahrscheinlich nicht über gewisse Grenzen hinaus wachsen.

Abbildung 2 zeigt das eindrucksvolle Wachstum der regenerativen Energien aus Wind und Sonne über die letzten Jahre sowie die Projektionen der Energiewirtschaft für die nähere Zukunft. Wenn man zum Beispiel die Werte für den jährlichen Zuwachs bei der Photovoltaik exponentiell in die Zukunft extrapoliert, erhält man die dramatische Wachstumskurve in Abbildung 1. Danach ließe sich bereits im Jahr 2032 der weltweite Strombedarf alleine mit Sonnenenergie decken. Realistische Wachstumskurven verlaufen allerdings nur stückweise exponentiell und tatsächlich sieht man an beiden Datensätzen bereits eine Sättigung des exponentiellen Wachstums deutlich unterhalb des zur Deckung der gesamten Elektrizitätsnachfrage nötigen Wertes von 0,11 TW/a. Die untere grüne Kurve in Abbildung 1 nimmt eine Sättigung des Zuwachses an Solarenergie im Jahr 2020 an, wie sie sich in Abbildung 2 andeutet, und danach ein lineares

Wachstum. Damit könnten etwa zehn Prozent des zukünftigen globalen Elektrizitätsverbrauches durch Sonnenenergie gedeckt werden. Bei Windstrom kommt man auf ähnliche Ergebnisse.

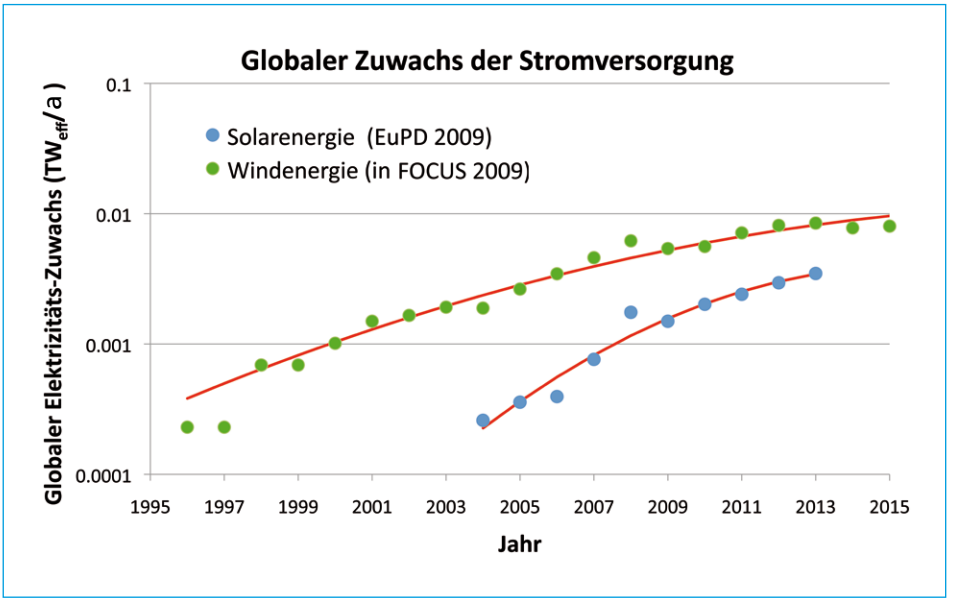



Abb. 2: Jährliches Wachstum der Stromerzeugung aus Windkraft und Solarenergie. Für den effektiven Beitrag von Wind- und Sonnenenergie wurden jeweils optimistische Werte von 2.000 bzw. 2.500 Volllaststunden pro Jahr angenommen. Beide Kurven zeigen anfänglich ein exponentielles Wachstum, das aber bereits innerhalb einer Dekade deutlich abgebremst wird. Um den globalen Strombedarf bis zum Jahr 2100 zu decken, würde man ein jährliches Wachstum von etwas mehr als 0,1 TW/Jahr benötigen. Die Extrapolation der hier dargestellten Modelle kommt auf etwa zehn bis zwanzig Prozent dieses Wertes.

Neben den Grenzen des Wachstums in der Produktion gibt es allerdings noch weitere wichtige Faktoren, die den Beitrag der regenerativen Energien zum Energiemix der Zukunft limitieren. Der erste Faktor hängt mit der niedrigen Energiedichte der Sonnen- bzw. Windenergie und dem damit verbundenen großen Flächenverbrauch zusammen. Betrachten wir zum Beispiel die weltweit größten solarthermischen Anlagen, die Andasol-Kraftwerke in der spanischen Provinz Granada: In der Endausbaustufe sollen drei einzelne Komplexe von jeweils etwa zwei Quadratkilometern Fläche insgesamt eine Spitzenleistung von 150 MW erzeugen. Jeder einzelne Komplex erzeugt damit eine maximale Leistung von 50 MW und unter optimistischer Annahme der Sonnenscheindauer eine mittlere Leistung von 14 MW. Wollte man den gesamten Strombedarf am Ende des Jahrhunderts mit derartigen solarthermischen Kraftwerken decken, bräuchte man dazu insgesamt 850.000 ähnliche Anlagen in den sonnenreichsten Regionen der Erde. Da es bis zum Jahr 2100 noch etwa 33.000 Tage gibt, müsste man an

jedem Tag im Mittel 25 solcher Komplexe ans Netz bringen – jede Stunde einen. Das scheint selbst bei optimistischer Betrachtung unmöglich. Selbst die vorher avisierten zehn Prozent dieses Wertes stellen eine gewaltige Herausforderung dar. Eine ähnliche Betrachtung kann man für Windturbinen anstellen: Es gibt bereits Pläne, riesige Windturbinen mit 10 MW Spitzenleistung zu bauen, etwa das Doppelte der größten heute betriebenen Turbinen. Nimmt man optimistisch 2.000 Volllaststunden pro Jahr an, würde man bis zum Jahr 2100 mehr als fünf Millionen solcher Windkraftanlagen benötigen, also im Mittel eine Windmühle alle zehn Minuten.

Eine zusätzliche Begrenzung der regenerativen Energien ergibt sich durch die zeitlichen Schwankungen der natürlichen Energieflüsse wie Sonne, Wind und Wasser. Größere und intelligente Netze können zwar einen erheblichen Teil dieser Fluktuationen ausgleichen, aber nicht komplett verhindern. Die Möglichkeit, Elektrizität mit den für einen sicheren Netzbetrieb notwendigen riesigen Kapazitäten zu speichern, ist heute noch Zukunftsmusik und benötigt große Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen in den nächsten Jahrzehnten. Alles in allem ist durch die hier beschriebenen Faktoren der Beitrag regenerativer Energien in diesem Jahrhundert realistisch auf zwanzig bis dreißig Prozent beschränkt.

### Fossile Energien

Eine weitere Möglichkeit zur $CO_2$-armen Stromerzeugung besteht in der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der anschließenden chemischen Abscheidung und Sequestrierung des dabei entstehenden Kohlendioxids (*Carbon Capture and Storage* – CCS). Mögliche Lagerstätten für verflüssigtes $CO_2$ sind zum Beispiel aufgegebene Kohleflöze und leere Öl- und Gaskavernen. Tatsächlich gibt es bei letzteren bereits umfangreiche technische Erfahrungen, weil $CO_2$ zum Teil benutzt wird, um restliches Öl oder Gas aus den leer werdenden Lagerstätten herauszupumpen. Die größte Speicherkapazität besitzen allerdings so genannte saline Aquifere, das sind unterirdische poröse Gesteinsformationen, in denen stark salzhaltiges Wasser gespeichert ist. Wenn derartige Formationen von Ton- oder Salzschichten umschlossen sind, eignen sie sich zur Einlagerung von $CO_2$. Die gesamte globale Speicherkapazität für $CO_2$ wird mit 2.000 bis 3.000 Gigatonnen abgeschätzt. Wenn es also gelingt, CCS großtechnisch im globalen Maßstab einzusetzen und das Treibhausgas sicher einzuschließen, ist die Reichweite dieser Methode dennoch nur auf einige Jahrzehnte beschränkt. Würde man bis 2100 etwa vierzig Prozent des globalen Stromverbrauches mit fossilen Brennstoffen und anschließender $CO_2$-Einlagerung erzeugen, wären die heute bekannten Endlagerstätten weitgehend erschöpft. Außerdem ist zu beachten, dass $CO_2$-Emissionen auf diese Weise nicht komplett vermieden werden könnten, sondern eine *Leckrate* von etwa dreizehn Prozent bleibt. Um den dabei entstehenden $CO_2$-Überschuss klimafreundlich abzubauen, müsste man wohl in großem Stil Biomasse zufeuern (Bio-CCS), wodurch der $CO_2$-Gehalt der Atmosphäre reduziert werden kann (siehe dazu auch die Diskussion von Goldston [3]).

**Nukleare Technologien**

Wenn der Beitrag der Erneuerbaren auf dreißig Prozent und der fossilen Brennstoffe auf etwa vierzig Prozent limitiert ist, werden immer noch etwa dreißig Prozent aus anderen $CO_2$-freien Energiequellen benötigt. Die einzige derzeit dafür zur Verfügung stehende Möglichkeit ist der Einsatz nuklearer Technologien. Tatsächlich gehen die meisten der oben diskutierten Energieszenarien davon aus, dass der Beitrag der nuklearen Technologien zur Stromversorgung, der derzeit weltweit etwa siebzehn Prozent beträgt, in Zukunft deutlich wachsen wird. In Abbildung 2 sind aus den Modellen der EMF-22-Gruppe der Median, sowie die 18 %- und 82 %-Quantile des nuklearen Beitrages zur künftigen Stromversorgung dargestellt (rote Linien). Im Vergleich zur Gegenwart steigt der erwartete Beitrag der nuklearen Elektrizität bei fast allen Modellen um etwa einen Faktor 10 an. Eine ganze Reihe von Szenarien nehmen noch deutlich höhere Steigerungsraten an. Das wirft erhebliche Fragen auf: zur Versorgung mit Brennstoff, zur nuklearen Sicherheit und zur geologischen Endlagerung der nuklearen Abfälle (die ebenfalls von Goldston [3] im Detail diskutiert werden). In jedem Fall werden neue und intrinsisch sichere Kraftwerkstechnologien der Generation III und IV benötigt. Aber auch damit stellt der Ausbau der nuklearen Kapazitäten ein erhebliches Risiko dar, vor allem bei der Proliferation nuklearen Materials.

Wenn es nun gelingt, die Versprechen der Kernfusion als saubere, sichere, bezahlbare und fast unbegrenzte Energiequelle in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einzulösen, könnte sie sukzessive die problematischen Kern- und Kohlekraftwerke ersetzen. Im Verhältnis zu Spaltkraftwerken sind die nuklearen Sicherheitsrisiken deutlich geringer: ein geologisches Endlager wird nicht benötigt. Der Fusionskurve in Abbildung 1 liegt die Annahme zugrunde, dass ab 2050 jährlich Fusionskraftwerke zugebaut werden können, die jeweils eine Kapazität von einem Prozent des globalen Strombedarfs decken können – eine ähnliche Steigerungsrate, wie sie weltweit beim Aufbau der Kernspaltungskraftwerke in den siebziger und achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts erreicht wurde. Bis etwa 2080 könnte man damit alle Kernspaltungskraftwerke ersetzen und bis 2100 etwa dreißig Prozent der globalen Elektrizität liefern – mit steigender Tendenz. Spätestens im nächsten Jahrhundert, wenn alle $CO_2$-Speicher gefüllt sein werden, wird diese Energiequelle dringend benötigt.

## 3. Fusionsreaktionen

Drei Minuten nach dem Urknall im frühen Kosmos wurden aus freien Protonen und Neutronen die ersten chemischen Elemente gebildet, zunächst die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, vor allem aber Helium und die leichten Elemente Beryllium und Lithium. Dabei wurden die zu diesem Zeitpunkt noch vorhandenen freien Neutronen weitgehend in stabile Elemente eingebaut, bevor die Neutronen mit einer Halbwertszeit von etwa elf Minuten zerfallen waren. Das überschwere Wasserstoffisotop Tritium, das für Fusionsreaktoren auf der Erde eine wichtige Rolle spielt, zerfällt nach einer Halbwertszeit von 12,5 Jahren und kommt deshalb in der Natur nicht vor.

Die Sonne verbrennt in ihrem Zentrum Wasserstoff zu Helium. Dies läuft in drei Schritten ab: Zunächst stoßen zwei Protonen zusammen und verschmelzen unter Abgabe eines Positrons und eines Elektron-Neutrinos zu dem schweren Wasserstoffisotop Deuterium. Dieser Prozess hat einen sehr geringen Wirkungsquerschnitt. Deshalb dauert es im Mittel etwa eine Milliarde Jahre bis ein Proton mit einem anderen zusammenstößt. Dazu ist eine Temperatur von etwa fünfzehn Millionen Kelvin und eine Dichte nötig, die etwa 150 Mal größer als die von Wasser ist. Die elektrisch positiv geladenen Teilchen stoßen sich durch die Coulomb-Kraft gegenseitig umso stärker ab, je näher sie sich kommen. Dennoch können bei diesen Temperaturen und Dichten die Protonen den abstoßenden Coulomb-Wall durch den quantenmechanischen Tunneleffekt überwinden, so dass im Sonneninneren jede Sekunde etwa $10^{38}$ Protonen zu Deuterium fusionieren. Im nächsten Schritt verschmelzen die Deuterium-Kerne mit einem weiteren Proton unter Abgabe eines Gamma-Quants zu Helium-3 ($^3$He), einem Isotop, das aus zwei Protonen und einem Neutron besteht. Der Wirkungsquerschnitt ist für diese Reaktion im Sonneninnern sehr hoch, so dass sie im Mittel nur eine Sekunde dauert. Zwei $^3$He-Kerne verschmelzen innerhalb etwa einer Million Jahre zu $^4$He, wobei die beiden überschüssigen Protonen wieder frei werden. Insgesamt wird pro Reaktion eine Energie von 26,2 MeV frei.

Die schwereren Elemente, vor allem Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff können erst bei den entsprechend höheren Temperaturen und Drücken entstehen, wie sie in den Zentren von Roten Riesen herrschen. Am Ende des Lebens sehr massereicher Sterne entstehen in deren Zentrum in sehr rascher Folge alle schwereren Elemente bis hin zum Eisen, das die höchste Bindungsenergie besitzt (Abbildung 3).

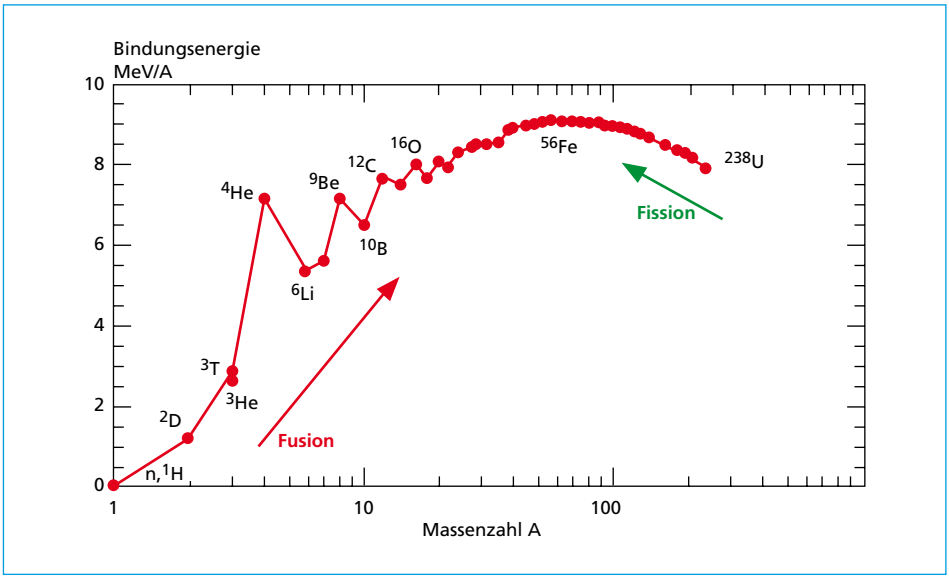



Abb. 3: Bindungsenergie der Atomkerne in Abhängigkeit von der atomaren Massenzahl A. Für Kerne leichter als Eisen kann durch Verschmelzung Energie gewonnen werden. Schwerere Kerne können unter Energiegewinn gespalten werden.

# Schlagwortverzeichnis

## A


Abfälle
  hochradioaktive 579, 626
Abnahme thermischer Kraftwerke
  nach VDI 2048 109
    Abnahmemessungen 115
Absorptionskolonne 101, 319, 332
Abwärmenutzung 395
Abzehrung
  korrosive 456
Actiniden
  minore 584
  Recycling 580, 585
Akzeptanz 53
  bei der Endlagerung
    hochradioaktiver Abfälle 625
  kerntechnischer Anlagen 645
Alkalien 173
Alkali-Getter
  alumosilikatische 173
Aminosäuresalz 313
  -Waschlösungen 342
Amin
  -radikale 79
  -wäsche 339
Ammoniak
  -schlupf 75, 80
  -wasser 79
Ammonium
  -chlorid 81
  -hydrogensulfat 80
  -sulfat 80
Anbackungen 172
Anergie
  Definition 307
Anfahr
  -simulation 693
  -verhalten 692
Anzapfungen 303
Asche
  -ablagerungsverhalten 482
    während der Mitverbrennung 478
  -beläge 445
  -schmelzverhalten 480
Asche-Salz-Proportionen (ASP) 457
Aspen Plus 331
Asse
  Stilllegung des Endlagers 633
Ausbrandverhalten
  gas- und feststoffseitig 708
Ausgleichsrechnung 110


## B


Batterien
  in Elektrofahrzeugen 541
Beläge 522, 728
Belags
  -bildung 371, 521
  -charakterisierung 731
  -monitor 457
  -reifung 458
  -sonde 457
Beschaufelung 386
Betriebs
  -störungen 698
  -unterbrechungsversicherung 135
Bevölkerungswachstum 4
Bilanzen 110
Bildauswertesystem 715
Bildgebungsverfahren
  tomographische 771
Bioenergienutzung 29
Bioerdgas 67
Biogaserzeugung 67
Biomasse 65
  Mitverbrennung im Kohlekraftwerk 88
Biomassekraftwerke 537
Blindleistungsregelung 542
Blockheizkraftwerke 541
  Mikro- und Mini-BHKW 69
BoA 495
Braunkohletrocknung 61
  Feinkorn-Trocknung 439
  Grobkorn-Trocknung 438
  industrielle Bedeutung 427
Brennelemente
  abgebrannte 578
  Radiotoxizität 585
Brenner
  -betrieb
    nichtstöchiometrischer 268
  -luftverhältnis 175
  -regelung
    kameragestützte 720
Brennstoffe
  Charakterisierung des
    Verbrennungsverhaltens 706
  korrosionsrelevante Eigenschaften 459
  schwierige 455
Brennstoffnutzungsgrade 67
Brückenbildung
  im Brennstoffbunker 532

Brüden
-kondensation 434
-nutzung
energetische 434
-verdichtung
mechanische 434

## C

**Carbon Capture and Storage (CCS)** 7, 27, 31, 51, 198, 207, 255, 283, 301
Anlagen im Pilot- und Demonstrations-Maßstab 305
Beschaffungsstrategien 255
CCS-Gesetz 53
Leckrate 7
Technologie 53, 221
Entwicklungsstand 255
Wirkungsgradeinbußen 306, 322
CCD-Sensoren 716
CCS
*siehe Carbon Capture and Storage*
CFD
-Analyse 754
-Simulation 769
der Luft- und Rauchgaskanäle 753
von Mehrphasenströmungen 784
Charakterisierung
des Verbrennungsverhaltens
von Brennstoffen 706
Chilled-Ammonia-Technologie 305
Chlor
-Kreislauf 469
-salze 463
Climate and Energy Package 52
$CO_2$
-Abscheidung 51, 61, 97, 197, 207, 242, 301, 315, 327, 331, 347
spezifischer Energiebedarf 106
-Abscheidegrad 188, 329
-Absorption 348
-Emission
unterschiedlicher Brennstoffe 358
-Infrastruktur 31
-Minderungsziele
der Europäischen Gemeinschaft 52
-Reinigung 188, 234
-Speicherung 61, 197
globale Speicherkapazität 7
-Verdichtung
(Verflüssigung) 202, 234, 318
-Wäsche 315, 327, 348
-Waschmittel 99, 315, 339
Carbonate und Piperazin 327
Regenerationsenergiebedarf 340
Substanzen und Additive 329
Umlaufrate 104, 324
CO-Korrosion 470
Computational Fluid Dynamics
*siehe CFD*
Condition-Monitoring-Systeme 560
COSTAIR-Brenner 745
Co-Verbrennung
*siehe Mitverbrennung*

## D

**Dampf**
-entnahme
an einer Dampfturbine 304
-erzeuger
Dynamik 692
Speicherfähigkeit 697
-kraftwerke
Simulationstools 315
solarthermische 6, 29, 565
-parameter
Anhebung 61
-rußblasen 449
-Sauerstoff-Vergasung 532
-trocknung 429
-turbinen 304
für solarthermische Kraftwerke 563
Parameter und Wirkungsgrade 383
-turbinentechnik
in Neubauprojekten 381
-wirbelschichttrocknung
druckaufgeladene 407, 416, 419, 689
DDWT 407, 416, 419, 689
Leckagedampfmengen 412
Versuchsanlage 407
DEA 340
DeNOx
kalte 238
-Katalysator
Simulation des Zeitverhaltens beim Anfahren 694
Desorption 305
Desorptionskolonne 319, 333
DeSOx-Verfahren 231
Übersicht 285
Diethanolamin (DEA) 340
Diffusor 754
Direct Contact Cooler (DCC) 332
Direktverdampfung
in solarthermischen Kraftwerken 566
Doppelrotormühle 420
Drallbrenner 226, 269, 276
Drallstufenbrenner 243
DREWAG 67
Drosselverluste 301

Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-
Trocknung von Braunkohlen 407, 416, 419, 689
Druckgeräteverordnung 649
Druckkammertechnologie 780
Druckwasserreaktoren 577, 613, 781
Verwendung von Thorium 613
Druckwirbelschichtfeuerung 519
DS-Brennertechnologie 244
DST-Brenner 228, 241

## E

Ebsilon Professional 315
Einspeisung
fluktuierende 540
Eisenhüttengase 373
Elektromobilität 541
Elektronenstrahltomographie
ultraschnelle 777
Emissionshandel 29
Endlager Asse
Stilllegung 633
Endlager für hochradioaktive Abfälle 625
Verfahren zur Standortfestlegung 627
Endlagersicherheit 645
**Energie**
-Dilemma 3
-forschung
nukleare 644
-management
dezentrales 539
-märkte
langfristige Entwicklung
in Deutschland 65
-produktivität 65
-systemmodellierung 516
-versorgung
regenerative/dezentrale
Marktentwicklung 65
Zuverlässigkeit 39
-versorgungskonzepte
Analysen 507
-versorgungssystem
intelligentes 541
Energien
erneuerbare 5, 22, 65, 356, 512, 539
Ausbau 22
Sättigungseffekte
für Ausbaupotenziale 508
Verteilung der Erzeuger
in Deutschland 510
fossile 7
Entnahme
geregelte 303
Entschwefelung 231, 285
Entstickung 73, 286
DeNOx-Katalysator 694
SNCR-Verfahren 75
Entstickungsreaktion
Nebenreaktionen 80
Environment System Research Institute (ESRI) 516
Erdgas 369
Bioerdgas 67
niederkalorisches 370
synthetisches 377
Erosion 472
Erosionskorrosion 467
Erschöpfungsberechnung 651
Erzeugungsmanagement
intelligentes 62
European Pressurized Reactor 577
Exergie
Definition 307
-verluste 307
Expertenmodus 226, 243

## F

Fallfilmreaktor 328
Falschluftanteil
Definition 188
Minimierung 212
Falschlufteinbrüche 212
bei Oxyfuel-Kraftwerken 187
Lokalisierung 189
FEED-Studien 257
Fernwärme 67
Fernwärmenetz 512
Feuerraumquerschnitt
Temperaturverteilung 77
Feuerung
korrosionsrelevante Eigenschaften 459
Feuerungs
-führung
Optimierung 77
-system
indirektes 243, 695
Filterasche
Gehalt an Ammoniumsulfat 80
Filterpermeabilität
bei der Reinigung von
Oxycoal-Rauchgasen 173

Flammen
-geometrie und -dynamik 722
-stabilität 241, 708
-temperatur 268
Messung 718
-überwachung
automatisierte 723
-vermessungen 170
Flüchtigenfreisetzung 272
Fluidisierung
der Wirbelschicht 422, 660
Fluorkunststoffe 182
Fresnelkollektoren 566
Front End Engineering and Design (FEED) 257
Fusions
-kraftwerk 8, 11
wichtigste Komponenten 16
-plasmen
Konzepte des magnetischen Einschlusses 12
-reaktionen 8
-reaktoren 10
-technik 3
Fuzzyregelung 663

## G

Garantiewerte 110
Gase
schwachkalorische 743
Gaskondensate 372
Gaskraftwerke
Neubau- und Ersatzbedarf in Europa 27
Gastrennmembranen
in der Kraftwerkstechnik 148
Gasturbinen 353, 527
Brennstoffeinsatz 369
Nutzung alternativer Brennstoffe 367
Wirkungsgrad 359
-kraftwerke 359, 369
-prozesse
mit integriertem Dampfprozess 395
-technik 393
Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD) 353, 376, 395
Gebäudekondensator 600, 609
Gen III-Reaktoren 8, 584
Gen IV-Initiative 583
Geoinformationssystem (GIS) 512
Getreidestroh 538
GiD-Prozess 393
Energieflussschema 397
Gittersensortechnik 771
Gleichdruckbeschaufelung 387
Globales Actinid-Management 590
GuD
-Kraftwerke 353, 376, 395
Abnahmemessungen 116

## H

Harnstoff 79
Hauptkomponentenanalyse 187
statistische Analysemethode 192
Heißgasfiltration 171
von Oxycoal-Rauchgasen 173
Heizflächen
-beläge 522, 728
-effektivität 501
-reinigung 504
-verschmutzung 451, 496
Hitachi Power Europe 241
Hochtemperatur
-Chlor-Korrosion 457, 467
-Gasturbine 353
-korrosion 140, 370
-membranen
zur Sauerstoffbereitstellung 150
-reaktor (Kernenergie) 579
heliumgekühlter 581
-werkstoffe 656

## I

IEKP 507
In-Core-Brennstoff-Managementschema 618
Industrieversicherungsmakler 135
Inert-Matrix-Brennstoffe 586
Infrarot-Kameras
Lokalisierung von Brennkammer-verschmutzungen 495
Wärmebilder 497
Inselsysteme 70
Instandhaltungsstrategie
zustandsorientierte 651
Integrierter Gas-Dampfprozess (GiD) 393
Investitionsbedarf in Erzeugungskapazitäten
für West- und Osteuropa 45

## K


Kamerasysteme
zur Erfassung thermischer Prozesse 716
KERENA™ 599, 607
Kernbrennstoffe 584
**Kernenergienutzung** 575
Ausbildung und Kompetenzerhalt in Deutschland 637
Brennstoffkreislaufstrategien 578
geschlossener Brennstoffkreislauf 583
Perspektiven in Deutschland 640
Renaissance 575, 584
Situation in Europa 639
Situation weltweit 638
Kernflutsystem
passives 609
Kernfusion 8
**Kernkraftwerke**
Akzeptanz 645
der Generation III 8, 584
der Generation IV 583
Forschungsprioritäten für die bestehenden Generationen 578
Konsequenzen einer Laufzeitverlängerung 641
Kraftwerkstechnik 599
Lastfolgebetrieb 642
Neubauprojekte und Planungen weltweit 637
Neubau- und Ersatzbedarf in Europa 28
Kernkühlung 781
Kernreaktor
*siehe Reaktor (Kernenergie)*
Kernschadenshäufigkeit 608
Kernschmelze 608
Kessel
-reinigung 445, 496
-wirkungsgrad
im Oxyfuel-Betrieb im Vergleich zum Luftbetrieb 238
Klärschlammverbrennungsanlage 664
**Kohlekraftwerk**
Cottbus 519
Datteln 47
Duisburg Walsum 121
Niederaußem 97, 495
**Kohlekraftwerke** 40
Neubau- und Ersatzbedarf in Europa 27
Weltmarkt 49
Wirkungsgrade 382, 390
Wirkungsgradsteigerung 753
Wirtschaftlichkeit von Investitionen 48
Kohlenstaub
-drallbrenner 226, 269, 276
-verpuffung 521
Kohletrocknungstechnik 407, 419
unter Druck 408
Kohlevergasung 375
Kokszündung 272
Kontakttrocknung 428
Korrosion 371, 445
in Dampferzeugern mit schwierigen Brennstoffen 455
Ursachen 458
Korrosions
-beständigkeit 179
-front 469
-früherkennung 457
-minderung durch Einflussnahme auf die Prozessgestaltung und Prozessführung 457
Kraft-Wärme-Kopplung
*siehe KWK*
**Kraftwerke**
Abnahmetest 111
Entwicklungsperspektiven 59
Inbetriebnahmen in Europa 47
konventionelle Marktenwicklung 39
solarthermische 6, 29, 563
Verteilung in Deutschland 511
**Kraftwerks**
-bau
Entwicklung der weltweiten Vergaben 368
Erfahrungen mit Lieferungen und Leistungen aus dem internationalen Umfeld 121
-erneuerung 42
-kapazität
Neubau- und Ersatzbedarf in Europa 26
-management 539
-neubaubedarf
Marktaussicht in der EU bis 2020 45
-parks in Europa
Altersstruktur 44
Sterbekurve 44
Kriech
-dehnung 656
-verhalten
dickwandiger Bauteile 656
Kühlmittelverluststörfall 601, 609, 780
KWK 67, 394, 507, 541
Einfluss des IEKP auf den Ausbau 507
-Anlagen 394
dezentrale 70
-Doppelstrategie 69
-Inseln 69

## L

Lachgas 81
Last
-änderungsverhalten 695
-betrieb 695
-flexibilität 63
-folgebetrieb 642
-folgefähigkeit 641
-gänge 513
-regelung
synchrone 359
-situation in Deutschland
bei Erreichen der IEKP-Ziele 508
-verhalten 692
Leckrate
CCS 7
Leichtwasserreaktoren 577, 601
Leistungs
-spitzen 508
-steigerungen
Garantievergleich nach VDI 2048 114
Leitschaufeln 363
LOCA-Störfall 601, 609, 780
Lösungsmittel
für die $CO_2$-Wäsche 99, 315, 329, 339
Carbonate und Piperazin 327
Regeneration 316
-umlaufrate 104, 324
Low Rank
-Fuels 715
-Kohlen 428
Lufteinbrüche
*siehe Falschlufteinbrüche*
Luftzerlegung 537
kryogene 148

## M

Maschinenversicherung 134
MDEA 99, 340
MEA 99, 305, 316, 327, 339
Mehrstoffbrenner
kamerabasierte Analyse
und Regelung 715
lastflexible 714
Membran
sauerstoffleitende 152
Membranprozess
zur Gastrennung 148
Mess
-unsicherheiten 110
-verfahren
bildgebende 769
Methanisierung
von Synthesegas 377
Methyldiethanolamin (MDEA) 99, 340
Mikrogasturbinen 743
Mikro- und Mini-BHKW 69
Mischbetttrockner 429
Mitverbrennung 661
Ascheablagerungsprobleme 477
von Biomasse 88
von Ersatzbrennstoffen 705
Molsiebadsorber 235
Monoethanolamin (MEA) 99, 305, 316, 327, 339
MOX-Brennstoff 620

## N

Nahwärmeinselnetze 69
Naphtha 372
Near Wall Cooling 361
Nettowirkungsgrade
von Kohlekraftwerken 390
Netz
-ausbau 31
-last
residuale 540
-management
dezentrales 539
-stabilisierung 359
-stabilität 68
-umbau 31
Neutronenausbeute 614
$NH_3$-Schlupf 75, 80
Notkondensator 601
$NO_x$-Emissionen
im Oxyfuel-Betrieb 175

## O

$O_2$-Regelungen 662
Objektversicherung 133
Ofensau 675
Offshore
-Fundamente 553
-Umspannwerk 558
-Windpark 551
-Windturbinen
Technologien 551
Oxidant 214
OXY-CLEAN-Konzept 155
OXYCOAL-AC
-Konzept 154
-Verbundvorhaben 169

Oxycoal
-Brenner
nichtstöchiometrischer 267
-Drallbrenner 174
-Verbrennung
kontrolliert gestufte 268
**Oxyfuel**
-Brenner 176
-Demonstrationsanlage in Jänschwalde
mit etwa 250 $MW_{el}$ (geplant) 220
-Fahrweise 242
-Konzepte
membranbasierte 153
-Kraftwerke
DeNOx-Technologie 283
Falschlufteinbrüche 187
Prozessüberwachung 187
Sauerstoffbereitstellung durch
Hochtemperaturmembranen 147
-Pilotanlage
in Lacq, Frankreich 210
in Schwarze Pumpe 187, 207, 221, 242
in den USA 210
-Verfahren 169, 207, 211, 221, 242,
256, 267, 283
Abbrandverhalten 211
CFD-Modelle 218
dynamisches Verhalten 218
Einfluss auf das Betriebsverhalten 211
Emissionsverhalten bei Teillast 250
pre-mixed mode 226, 243
Rauchgasentschwefelungsanlage
Auslegung 231
Rezirkulationsraten 214
Stickoxid-Emissionen 175
Wärmeübertragungsverhalten 216
OXY-VAC-JÜL-Konzept 156

## P

Parabolrinnen
-kollektoren 566
-kraftwerke 564
Perowskitmembranen 150
PFBC-Technologie 519
Photovoltaik 29, 67, 70
Piperazin 330, 340
Plutonium 578
-verwertung 619
Polymermembranen 150
Post Combustion Capture 208, 256, 303
energetischer Vergleich
chemischer Lösungsmittel 315
Pilotanlage in Niederaußem 97
*siehe auch $CO_2$-Abscheidung*
pre-mixed mode 226, 243
Primärenergie
-ausnutzung 548
-verbrauch
pro Kopf (weltweit) 3
Struktur 66
Proliferation 8, 613, 645
Purex-Verfahren 589
Pyroprocessing 581

## Q

Qualitätsmanagement
internes 132

## R

Radiotoxizität 584
Radkowsky-Thorium-Brennstoff-Konzept 617
Rauchgas
Gesamtdruckverlust 754
-entschwefelung 231, 285
Auslegung für den Oxyfuel-Prozess 231
-entstickung 73, 286, 694
-geschwindigkeit 79
-kanal
Druckverlauf der Strömung 756
Geometrie 754
-kondensationsanlage 232
-kühler
mit neuen Fluorkunststoffen 179
-reinigung 284
-rezirkulation 169, 213
externe 268
interne (am Brenner) 268
-verschiebungssysteme 179
-wäsche ($CO_2$) 315, 327, 349
-zusammensetzung 77
Reaktionsbeschaufelung 386
Reaktor (Kernenergie)
bleigekühlter schneller 580
gasgekühlter schneller 580
natriumgekühlter schneller 579
-druckbehälter 141, 601, 608, 638
-schnellabschaltsystem 609
-schutzsystem 609
-sicherheit 578
Reboiler 316
-temperatur 324
Reburning 170, 176, 215
Reflux-Condenser-Betrieb 781
Regelleistung
negative 508

Regelungstechnologien
intelligente 663
Regelverhalten
von Wirbelschichtanlagen 661
Regionenmodell 512
Restlastgang 516
Retrofitmaßnahmen 114
Ringbrennkammer 363
Risiko
-analyse 131
-bewertung 131
-finanzierung 132
-management 130
bei Neubau- und Retrofitprojekten 129
-transfer
mit Versicherungen 132
Rohrleitungsmonitoring 651
Rußbläsersysteme 445

## S

Salzschmelzenkorrosion 467, 471
Sauerstoff
-bereitstellung 148, 152, 537
mittels Gastrennmembranen 150
-mangelkorrosion 470
-regelungen 662
SB 621
SBU-Konzept 617
Schadenmanagement
bei Neubau- und Retrofitprojekten 129
in der Kraftwerkspraxis 137
Schaufelblatt 363
Schwachgase
Verbrennung in Mikrogasturbinen-Brennkammern 743
Schwefelkorrosion 212
Selektive Katalytische Reduktion (SCR) 287
Seed-Blanket-Brennelemente (SB) 621
Shippingport-Leichtwasserbrutreaktor 613
Sicherheitssysteme (Kernenergie)
aktive 599
Kombination der aktiven und passiven 608
passive 599, 609
Siedewasserreaktoren
der Generation 3+ 577, 607
Siedewassertechnologie 599
Simulations
-analyse 754
-rechnung
der Rauchgasströmung 757
-tool
für Kraftwerkskomponenten 315
Siphonasche 534
Smart Grid 539
variable Stromtarife 542
Smart Meter 542
Selektive Nicht Katalytische Reduktion (SNCR) 73, 287
Anordnung der Eindüsungspunkte für das Reduktionsmittel 93
Grundlagen 74
SNG 377
Solarenergie 6, 29
Solarfelder 564
mit direkt verdampfenden Kollektoren 565
Wirkungsgrade 568
solarthermische Kraftwerke 6, 29
Wasser-Dampf-Kreislauf und Dampfturbine 563
Solarturmkraftwerke 564
Spaltnuklidbestand 621
Speicher
thermische 541, 564
-ausbau 31
Speisewasservorsteuerung 696
Sprühturmabsorber
zur Rauchgasentschwefelung 231
Sprühwäscher
zur Abtrennung von $CO_2$ 347
Stahl
warmfester 656
Staubbrennertechnologien
lastflexible 713
Staubrückführung 421
Steinkohledampferzeuger
Simulation der Dynamik 691
Steinkohlekraftwerke
Wirkungsgrad 382
Stellaratorprojekte 13
Stickoxid-Emissionen
im Oxyfuel-Betrieb 176
Stilllegung
des Endlagers Asse II 633
Störfall
-beherrschung
passive 609
-drücke 702
Strahl-/Drall-Brenner 226

Stroh
-kraftwerke 531
-vergasung 532
-verwertung
energetische 532
Strombedarf
Entwicklung in Europa 23
Entwicklung weltweit 4, 40, 59
möglicher Beitrag verschiedener Energien 5
Stromerzeugung
dezentrale 28
in Deutschland
Aufteilung 2009 40
in Europa
Entwicklung bis 2030 21
regenerative 67
Umbau der Erzeugungskapazitäten 24
Strom
-gestehungskosten 569
-mix
in der EU27 21
-netz 31, 68, 539
-tarife
flexible 539
-versorgung
der Zukunft 539
in Deutschland
politischer Rahmen 507
politische Ziele 508
-zähler
intelligente 542
Strömungsmesstechnik 769
Superfact-Experiment 588
Synthesegas 370, 374
Methanisierung 377

## T

Tauchheizflächen 679
Temperatur
-messung 76
akustische 93
in Flammen 718
-verteilung
über den Feuerraumquerschnitt 77
Thermal Barrier Coating 363
Thermoölkreislauf
im Solarfeld 564
Thorium 613
-Brennstoffzyklus 613
-Plutonium-Mischoxid-brennstoff (TOX) 620
-Uran-Brennstoffkreislauf selbsterhaltender 620
-Uran-Trennprozess 616
Transmutation 584
Treibhausgasemissionen 29
Tritium-Brüten 10
Trockenbraunkohle 276, 407, 419, 429
Trocknung von Braunkohle 61, 427, 438
in einer druckaufgeladenen Dampfwirbelschicht 679
in einer Wirbelschicht mit interner Abwärmenutzung (WTA) 428
Tropfenabsorption 343, 347
Turbinen
Korrosion 370
-kondensator 389
-schnellschluss 699
-technik
Anforderungen 384
Turbosatz 383

## U

Überhitzerreinigung
mit Wasser 445
Umwälzpumpenausfall 698
Uran 576, 613
-kreislauf 613
-Plutonium-Mischoxidbrennstoff 619
-Plutonium-Trennung 616

## V

Vattenfall 241, 381
Verbrennung
kontrolliert gestufte 267
Verbrennungsverhalten
von Brennstoffen 706
Vergasung 374
in der Wirbelschicht 538
von Stroh 532
Versagen
thermisches 361
Versagensmechanismen 361
Verschlackungen 445, 477
Verschmutzungen 176, 445, 495, 521
Versicherung 132
Verteilernetze 31
Steuerung durch variable Tarife 542
Vorgemischtfahrweise 226, 243
VPSA-Technik
(Vacuum Pressure Swing Adsorption) 537

## W


Wärme
-bedarfsdichte 509
-bereitstellung
Energieeinsatz 66
-bilder
der Brennkammerwandheizflächen 497
-erzeugung
in Kraft-Wärme-Kopplung 69
-flexibilität 397
-netze 509
-pumpen 70
-senken 509
-stromdichte 216, 466
Messung
zur Belagsbestimmung 727
-stromsensoren 457
-übergang
in der Wirbelschicht 422
-verbrauch 115
Standardverfahren zur Beurteilung 112
WASB-Konzept 617
Wäsche
alkalische zur gemeinsamen Entfernung
von $NO_x$ und $SO_x$ 293
Waschlösungen für die $CO_2$-Abtrennung
Regenerationsenergiebedarf 340
Vergleich verschiedener
Waschlösungen 339
Waschmittelumlaufrate 104
Wasserbläser 447, 496
Wasser-Dampf-Kreisläufe
solarthermische 564
Wasserkraftanlagen
Neubau- und Ersatzbedarf in Europa 28
Wasserlanzenbläser 496
Wasserstoffproduktion
nukleare 581
Wasser-Wasser-Energie-Reaktoren 601
Weichbraunkohle 427
Weltbevölkerung 4
Werkstoffverhalten
Überprüfung 656
Wiederaufarbeitung
von Kernbrennstoffen 580, 585, 589
Wind
-energie 6, 22, 65, 355
-kraftanlagen
Neubau- und Ersatzbedarf in Europa 27
Technologien 551
-park alpha ventus 553
**Wirbelschicht** 421, 679
Fluidisierung 422, 660
hydrodynamisches Modell zur
numerischen Simulation 689
Modellierung 679
moderne Regelung 659
Regelverhalten 661
stationäre 660
Wärmeübergang 422
zirkulierende 532, 660
-feuerungen 659
-kohle 520
-Kontakttrockner
Optimierung der Auslegung 430
-technologie 531
druckaufgeladene 519
-trocknung
in Dampfatmosphäre 419
mit interner Abwärmenutzung
(WTA) 427
-vergasung 538
Wirkungsgrad
Standardverfahren zur Beurteilung 111
von Steinkohlekraftwerken 382
-entwicklung
verschiedener Kraftwerkstypen 357
-steigerung 61, 753
durch die WTA-Technik 428
-verlust
durch CCS 306, 322
WTA-Trocknungstechnik 428


## Z


Zeitstanderschöpfung 651
Zellenradschleusen
optimiertes Dichtprinzip 413
Zünd- und Ausbrandverhalten 709
Zustandsüberwachung von Rohrleitungen
und dickwandigen Bauteilen
mit Onlinesystemen 649
Zwischenkühlerbetrieb 106
Zwischenüberhitzung 306
Zyklonverstopfung 524