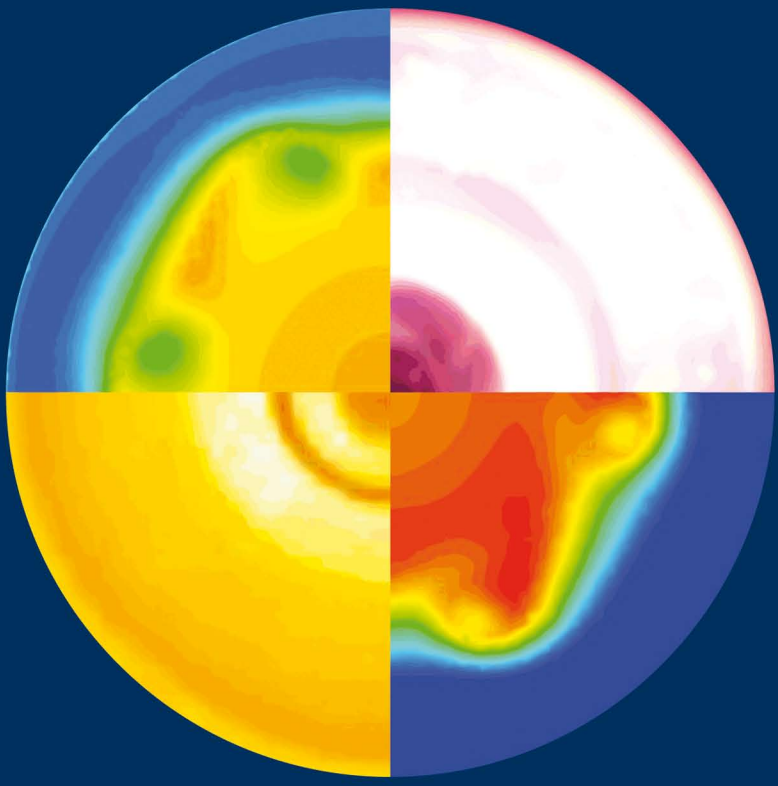
Michael Beckmann Antonio Hurtado

KRAFTWERKSTECHNIK

– Sichere und nachhaltige Energieversorgung –

Band 4



TK

Michael Beckmann

Antonio Hurtado

KRAFTWERKSTECHNIK

– Sichere und nachhaltige Energieversorgung –

Band 4

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Kraftwerkstechnik
Sichere und nachhaltige Energieversorgung – Band 4
Michael Beckmann, Antonio Hurtado.
– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012
ISBN 978-3-935317-87-0

ISBN 978-3-935317-87-0 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

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

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2012
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. Michael Beckmann und
Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Erfassung und Layout: Dipl.-Kffr. Elke Czaplewski, Petra Dittmann, Sandra Peters,
Martina Ringgenberg, Ginette Teske
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München
Foto auf dem Buchdeckel: Dipl.-Ing. Sebastian Kretschmer, Elco Burners GmbH, Pirna
Andreas Unger, Foto-Studio-Unger, 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.

Die Energieversorgung ist eine globale Aufgabe, die sich den Zielen von Wirtschafts-, Umwelt- und Sozialverträglichkeit sowie Ressourcenschonung gleichermaßen widmen muss. Kurz zusammengefasst bedeutet das, nicht nur regional, sondern weltweit dem Dreieck einer sicheren, sauberen und bezahlbaren Energieversorgung gerecht zu werden. Dabei existiert kein naturwissenschaftlich begründetes Gleichgewicht. Vielmehr muss dieses Gleichgewicht neu auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse, wirtschaftlicher, demografischer Entwicklungen und politisch verantwortungsbewusster Zielstellungen laufend angepasst und z.T. auch mit ganz neuen Richtungen angesteuert werden. Der Begriff der Energiewende in Deutschland ist ein aktuelles Beispiel für die Neubestimmung des Kurses der Energieversorgung – hin zu alternativen und additiven (erneuerbaren) Energieträgern, wie Biomasse, Solar- und Windenergie. Die Energiewende ist kein einfaches Manöver, bei dem nur kurz der Wind direkt auf den Bug bläst. Warnende Skeptiker können sich zum Beispiel darauf berufen, dass die Zahl der Netzeingriffe in dem vergangenen Winter, die Redispatchmaßnahmen, der Einsatz von Kaltreservekraftwerken usw. dramatisch zugenommen haben und damit die Stabilität bedroht ist. Dabei handelt es sich um messbare Größen und Zusammenhänge. Ebenso messbar und spürbar ist der Anstieg des Energiepreises, der insbesondere auf gestiegene Konzessionsabgaben, Umlagen nach EEG und KWKG zurückzuführen ist. Stabilität und Preis der Energieversorgung kann man in den Kontext der Sozialverträglichkeit stellen. Die Umweltverträglichkeit hingegen ist wenig messbar, allenfalls kann sie beurteilt, bewertet werden. Doch dabei spielen Betrachtungswinkel, Ausgangs- und Randbedingungen eine nicht unwesentliche Rolle. Die Energieversorgung befindet sich im obengenannten Zieldreieck in einem Ziel- und Interessenkonflikt, der wie erwähnt laufend abgeglichen und dafür auch entsprechend offen diskutiert werden muss. Dabei darf es keine Unterdrückung von Meinungen geben, dürfen Skeptiker nicht als Verhinderer angeprangert werden – es gilt, Zwischenziele zu finden, diese anzusteuern und die dabei gewonnenen Erkenntnisse in die Weiterentwicklung einfließen zu lassen. Der offene Dialog führt zu dem Fortschritt, wie wir ihn weiterhin benötigen; der Anspruch auf endgültige Wahrheit und unumstößliche Gewissheit bei der Bewältigung derart komplexer Zusammenhänge wie bei der Energieversorgung muss zur Skepsis aufrufen.

Das KRAFTWERKSTECHNISCHE KOLLOQUIUM verfolgt das Ziel eines offenen Dialoges. In dem vorliegenden Buch finden sich Ergebnisberichte, Ideen und Lösungsansätze ganz unterschiedlicher Bereiche der Energieversorgung. Es werden nach wie vor konventionelle Kraftwerksprozesse und zugehörige Komponenten in den einzelnen Beiträgen behandelt. Dabei stehen bei fossilen Dampferzeugern neben den nahezu traditionellen Fragestellungen der Effizienzsteigerung, der Verschlackung, der Korrosion und der Emissionsreduzierung auch neu hinzugekommene Anforderungen hinsichtlich der Flexibilität im Focus. Darüber hinaus werden Weiterentwicklungen von Gas- und Dampfturbinen behandelt. Wind-, Solar- und Geothermiekraftwerke finden zunehmend Einzug in die Energieversorgung und somit auch in das KRAFTWEKRSTECHNISCHE KOLLOQUIUM. In der sich verändernden Energieversorgung muss zunehmend neben der Energieumwandlung und Bereitstellung auch die Verteilung und damit die Anforderung an die Netze angesprochen werden. Die Beiträge von 75 Autoren sind in dem vorliegenden Buch in den Abschnitten

- Fossile Kraftwerke
- Gas- und Dampfturbinen
- Pilot- und Neubauprojekte
- Solarkraftwerke
- Netze und Speicher
- CCS-Technologien
- Windenergie
- Verschlackung und Korrosion
- Messtechnik/Simulation

enthalten.

Den Autoren und Co-Autoren gebührt großer Dank. Durch die redaktionelle Bearbeitung und die Qualität der Präsentation in diesem Buch möchten wir ihren Aufsätzen, die wie immer termingetreu in hoher Qualität und in der Regel zusätzlich zu den beruflichen Verpflichtungen erarbeitet worden sind, eine entsprechende Würdigung verleihen.

Die Gestaltung des Programmes wurde auch in diesem Jahr aktiv von dem Programmbeirat unterstützt. Wir freuen uns sehr, dass wir mit Frau Dipl.-Ing. Britta Daume eine Unternehmerin der Kraftwerkstechnik gewinnen konnten. An sie und die Herren Dipl.-Ing. Hubertus Altmann, Dr. Franz Bauer, Dipl.-Verwaltungswirt Erich Fritz, Oberregierungsrat Dr. Arne Höll, Dr.-Ing. Reinhard Maaß, Dipl.-Ing. Jürgen Maier, Professor Dr.-Ing. Bernd Meyer, Dipl.-Ing. Peter Nothnagel und Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl J. Thomé-Kozmiensky möchten die Herausgeber einen ganz besonderen Dank richten.

Ohne die Unterstützung von Förderern und Sponsoren wären der Druck des Fachbuches in der vorliegenden Qualität und die Teilnahme von Studenten zahlreicher Universtäten nicht möglich. Bedanken möchten wir uns bei den Firmen: AREVA NP GmbH, Babcock Borsig Steinmüller GmbH, Bilfinger Berger Industrial Services GmbH, CheMin GmbH, Clyde Bergemann GmbH, CMV Systems GmbH & Co. KG, ERC Emissions-Reduzierungs-Concepte GmbH, Hitachi Power Europe GmbH, LAMTEC Meß-und Regeltechnik für Feuerungen GmbH Co. KG, Linde Engineering Dresden GmbH, Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, Mehldau & Steinfath Umwelttechnik GmbH, SAACKE GmbH, SIEMENS AG, STEAG Energy Services GmbH, TBF + Partner AG, Vattenfall Europe AG, Wallstein Ingenieur GmbH und Westinghouse Electric Germany GmbH für ihre Inserate. Die Veranstaltung wird durch die Spende der DREWAG Stadtwerke Dresden GmbH, der Vosteen Consulting GmbH und auch durch die Verteilung von Programmankündigungen in den Fachzeitschriften sowie die Werbung im Internet durch den VGB und den FDBR wohlwollend unterstützt.

Zu großem Dank sind die Herausgeber dem TK Verlag, Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl Thomé-Kozmiensky und seinen Mitarbeiterinnen – Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Martina Ringgenberg, Petra Dittmann, Ginette Teske und Sandra Peters – verpflichtet. Durch ihre Arbeit verwandeln sich die einzelnen Manuskripte zu einem einheitlichen Erscheinungsbild. Die Zusammenarbeit geschah in bewährter Weise in angenehmer und kreativer Atmosphäre.

Das KRAFTWERKSTECHNISCHE KOLLOQUIUM mit all den sichtbaren und unsichtbaren Aufgaben bei der Herstellung des Buches, dem Ablauf der Tagung, der Firmenpräsentation u.v.m. liegt ganz wesentlich in den Händen von Dipl.-Kffr. Elke Czaplewski – ihr möchten wir daher herzlichen Dank sagen.



Erstmals in diesem Jahr erfolgt die Verleihung des Werner Boie Preises für einen herausragenden Beitrag des vergangenen Kolloquiums. Damit möchten wir einerseits das Werk von Werner Boie in der Kraftwerkstechnik in der Erinnerung wach halten und andererseits – ganz in seinem Sinne – wissenschaftliche Nachwuchsarbeiten auszeichnen. Der Wert des Preises ist seine Exklusivität, geschaffen von einem jungen Künstler, Herrn Thomas Weber; er ist Absolvent an der Hochschule für Bildende Künste in Dresden und Schüler von Herrn Professor Ulrich Eißner. Dank gebührt an dieser Stelle somit auch Herrn Weber und Herrn Professor Eißner für die interessante Zusammenarbeit und die kreative Gestaltung des Werner Boie Preises.

Oktober 2012

Michael Beckmann

Antonio Hurtado

Inhaltsverzeichnis

Strategie und Recht

EU-Energiepolitik aus der tschechischen Perspektive
Petr Binhack 3

Zukunftsfähigkeit durch technische Innovation – Gestern und Heute
Klaus Mainzer 13

Chancen und Herausforderungen der Energiewende
Hans Bünting und Thomas van Lith 33

Perspektiven für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien
Michael Beckmann, Christoph Pieper, Reinhard Scholz und Marc Muster 43

Flexibilitätsanforderung des fossilen Kraftwerksparks zur Unterstützung des Ausbaus der regenerativen Energieversorgung
Imo Pfaff, Mathias Fruth und Lars Wiese 71

Neuregelungen zum Stromnetzausbau in EnWG und NABEG
Markus Appel 87

Pilot- und Neubauprojekte

Kombinierte Energiegewinnung aus Abfall, Erdgas und Biomasse – Das Projekt Energiezentrale Forsthaus –
Jutta Ansorg, Felix Trachsel und Markus Wieduwilt 107

Leistungssteigerung mit Kohlebanderweiterung für einen 1.000 t/h steinkohlenstaubgefeuerten Dampferzeuger
Hans-Ulrich Thierbach, Florian Nassenstein, André Riemensperger und Stefanie von Andrian-Werburg 119

Höchste Leistung – niedrigste Emissionswerte – Prognose und Einhaltung der zugesicherten Eigenschaften am Beispiel der Ertüchtigung eines schwerölgefeuerten 700 MW Blocks –
Uwe Konold, Gerfried Koinig und Jean-Christophe Issartier 131

Bisherige Erfahrungen im Projekt Boxberg R am Beispiel des Dampferzeugers
Günter Heimann und Thomas Brunne 141

OptiMa – Energieeffizienzsteigerung im HKW Mannheim mit Hilfe der Auslegungs- und Simulationssoftware THERMOFLEX-PEACE (Thermoflow Inc.)
Thorsten Hauschildt und Karsten Huschka 149

Planung, Einsatz und Entwicklung thermischer Kraftwerke mittlerer Größe unter neuen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen
Ilja Tuschy, Maik Render und Aiko Vogelsang 159

Erkenntnisse aus dem Testbetrieb und Ausblick zur weiteren Nutzung der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall
Uwe Burchhardt, Steffen Griebe, Peter Zimmer, Richard Faber, Rainer Giering und Alexander Gerhardt 169

Einsatz von hochauflösendem terrestrischen Laserscanning zur Zustandsermittlung von Kühlturmeinbauten
Hans-Peter Tielsch, Gert Werner und Frank Paula 185

Online Messung von Film bildenden Aminen
Marco Lendi und Peter Wuhrmann 195

Flexible Kraftwerke

Optimierung der Prüfkonzepte als Voraussetzung für einen flexiblen Anlagenbetrieb
Axel Schulz, Detlef Rieck, Michael Schuhknecht, Gerhard Dreier, Christian Schrandt und Uwe Rechtien 205

Flexibilitätssteigerung durch betriebsorientierte Auslegung von Post-Combustion Capture Prozessen für Kraftwerke
Sven Multhaupt, Lisa Woettki, Gerd Oeljeklaus, Klaus Görner und Alexander Schraven 213

Optimierung der Regelung im HKW Lichterfelde, Verlagerung des Regelbandes in den Schwachlastbereich, Realisierung und Betriebserfahrungen
Bernhard Beyer und Christiane Jahn 225

Möglichkeiten und Grenzen der Flexibilisierung

Sascha Lüdge 237

Entwicklung und Anwendung dynamischer Modelle in der Auslegung von Kraftwerken

Bastian Kowalczyk und Klaus-Dieter Tigges 245

Lastwechsel bei CCS-Prozessen: Dynamische Simulation einer CO_2-Wäsche am Beispiel der Pilotanlage in Niederaußem

Lidia Aman, Norbert Mollekopf, Andrea Ohle, Torsten Stoffregen und Leon Urbas 261

Untersuchung des Teillastbetriebes von Dampfkraftprozessen mit CO_2-Abtrennung

Christoph Hasenbein, Volker Roeder und Alfons Kather 273

Dynamische Strömungs- und Verbrennungssimulation der Wirbelschichtfeuerung im HKW Wuppertal-Elberfeld und Erkenntnisse für den Betrieb

Martin Weng, Stefan Tschunko und Joachim Plackmeyer 285

Rechnerische Analysen zur Fluid-Struktur-Interaktion bei Druckpulsationen in Rohrleitungssystemen

Thorsten Neuhaus und Wolfgang Drießen 295

Untersuchung der Schwachlastfähigkeit der Blöcke G und H im Kraftwerk Weisweiler anhand von Stabilitätsberechnungen des Dampferzeugers

Stefan Hamel, Christoph Nachtigall, Philipp Schiffer, Tobias Linke, Andreas Müller und Andreas Brühl 309

CCS-Technologien – Oxyfuel

Der Oxyfuel-Prozess für eine Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung mit kryogener Luftzerlegung

Claas Günther, Matthias Weng und Alfons Kather 323

Einzug der Trockensorption in die Rauchgasreinigung der neuen Kraftwerksgeneration – SO_3-Abscheidung an einem Gewebefilter –
Rudi Karpf, Thomas Porsche und Daniel Kosel 335

Untersuchung zur Verbrennung unterschiedlicher Brennstoffqualitäten an den Oxyfuel Pilotanlagen
Frank Kluger, Patrick Mönckert, Thomas Wild und Armand A. Levasseur 351

Untersuchungen zur Ableitung der Verschmutzungs- und Verschlackungsneigung unter Oxyfuel-Bedingungen am Beispiel von Lausitzer Trockenbraunkohle
Christopher Thiel, Martin Pohl, Michael Beckmann und Wolfgang Spiegel 367

Auslegung einer membranbasierten Luftzerlegungsanlage für ein Oxyfuel-Dampfkraftwerk
Jewgeni Nazarko, Alexander Otto, Andreas Herbergs, Michael Weber und Detlef Stolten 377

CCS-Technologien – Postcombustion und CO_2-Speicher

Phase II des CO_2-Wäsche-Entwicklungsprogramms der PCC Pilotanlage in Niederaußem
Frank Rösler, Torsten Stoffregen, Peter Moser, Tobias Ginsberg, Georg Sieder und Javier Garcia-Palacios 399

Umfassende Untersuchungen von wässrigen Carbonatlösungen zur Beurteilung und Auslegung von PCC-Anlagen in Kraftwerken
Peter Behr, André Maun, Kai Alexander Tunnat und Klaus Görner 411

Carbon Capture-Lösungen für Kraftwerke und industrielle Anwendungen
Peter Erich Arnold 423

CO_2-Speicherung – ein Beitrag zur Energie- und Rohstoffsicherung
CO_2 – Methanisierungsrohstoff für die Power to Gas to Power Technologie (PGP)
Steffen Schmitz 433

Verschlackung und Korrosion von Dampferzeugern

Simulation der Mineralumwandlung in Dampferzeugern zur Abschätzung von Verschlackungen und Verschmutzungen
Horst Müller, Martin Strelow, Ioana Magda, Adrian Magda und Reinhard Leithner 443

Messmethode zur Ermittlung von Stoffeigenschaften von Ablagerungen an Dampferzeuger-Membranwänden
Sebastian Grahl, Michael Beckmann und Wolfgang Spiegel 455

Gezielter Einsatz von Diagnostik und Analysesoftware zur intelligenten On-load Kesselreinigung
Daniel Bartels, Nina Heißen, Christian Mueller, Antti Kommulainen, Peter Lange, Frank Wutzler und Ralf Koschack 469

Modellgestützte Vorhersage von Verschmutzungen und Verschlackungen in kohlestaubgefeuerten Dampferzeugern
Olaf Lemp, Uwe Schnell und Günter Scheffknecht 485

Emissionen

Emission und Entstehung von Quecksilber in mit Steinkohle betriebenen Kraftwerken in Korea und Deutschland
Deepak Pudasainee, Hanns-Rudolf Paur, Jens Korell, Helmut Seifert und Yong-Chil Seo 497

Problemstellung und messtechnische Besonderheiten bei der Erfassung von Staubemissionen in kraftwerkstechnischen Anlagen
Roland Zepeck 509

Kohlekraftwerke im Fokus der Quecksilberstrategie
Rolf Beckers, Joachim Heidemeier und Falk Hilliges 519

Versuche und Betriebserfahrungen mit bromgestützter Quecksilberabscheidung an mehreren US-amerikanischen Kohlekraftwerken
Bernhard W. Vosteen, Tim C. Hartmann und Mark S. Berry 537

Stickoxidminderung SCR/SNCR

Die SNCR-Technologie an Großkesseln – Betriebserfahrungen mit der ersten kommerziellen Anlage an einem Steinkohleblock von 225 MW_{el} –

Zoltan Teuber, Karlheinz Huber und Philip Reynolds 599

Einsatz eines Topologieoptimierers zur Reduzierung von Strömungsverlusten in den Rauchgaskanälen

Henning Zindler, Fang Yang, Markus Stephan und Jens Iseler 609

SNCR-Verfahren der Zukunft für Großfeuerungsanlagen – Konzepte, Erfahrungen, TWIN-NO_x-Verfahren –

Bernd von der Heide 623

Gas- und Dampfturbinen

Erste Erprobungsergebnisse der GiD-Versuchsanlage im Zentrum für Energietechnik der Technischen Universität Dresden

Karl Hoffmann, Uwe Gampe, Guntram Buchheim, Hans-Dieter Keim, Jürgen Fischer und Giorgio Spina 639

Dampfturbosätze für Geothermieanwendungen

Michael Barth 649

Modelle zur Simulation der radialen Turbomaschinenkomponenten von Mikrogasturbinen

Ansgar Willburger und Martin Lawerenz 661

Brennstoff- und Betriebsflexibilität anhand von Betriebserfahrungen mit Alstom Gasturbinenneuanlagen

Peter Marx 681

Wind-, Solar- und Geothermiekraftwerke

ISCC-Technologie – Konzeptanalyse zur Integration von Solarwärme in GuD-Kraftwerke
Tobias Vogel, Benedikt Wahl, Gerd Oeljeklaus und Klaus Görner 703

Großtechnische Nutzung der Sonnenenergie – Solarkessel-Konzept für solarthermische Kraftwerke –
Ulrich Hueck 719

Abschätzung des Windenergiepotenzials von Deutschland
Fabian Gans, Lee Miller und Axel Kleidon 729

Geothermie – Regenerative Energiequelle zur Erzeugung von Strom und Fernwärme
Annett Kutzschbach, Amir Mansour und Martin Weiß 737

Speicher

Adiabate Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung – der ADELE-Wärmespeicher
Stefan Zunft, Michael Krüger, Volker Dreißigacker, Peter-Michael Mayer, Christoph Niklasch und Christine Bertsch 749

Kraft-Wärme-Kopplung mit Gasmotoren und Wärmespeicherung
Peter Pechtl und Klaus Payrhuber 759

Entwicklung eines Hochtemperatur-Wärmespeichers zur Flexibilisierung von GuD-Kraftwerken
Knut Stahl, Stefan Zunft, Stefan Kessler und Michael Siebert 777

Lastganganalyse zur Bestimmung der Wechselwirkungen ausgewählter Speichersysteme
Christoph Pellinger, Tobias Schmid und Michael Beer 785

Energiespeicherung mittels flüssiger organischer Wasserstoffträger

Karsten Müller, Daniel Teichmann, Peter Wasserscheid und Wolfgang Arlt 795

Adiabate Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung – Der nächste Schritt: ADELE-ING

Peter Moser, Roland Marquardt, Sebastian Freund, Michael Klafki und Predag Pijanovic 803

Isobares GuD – Druckluftspeicherkraftwerk mit Wärmespeicher

Niels Oliver Brinkmeier, Lasse Nielsen, Dawei Qi und Reinhard Leithner 815

Anforderungen der Netze an die Erzeugung

Neue Aufgaben der thermischen Kraftwerke in nachhaltigen Energiesystemen

Günther Brauner 827

Echtzeitsimulator zur Prüfung des stabilen Regelverhaltens von Dampfkraftwerken am elektrischen Netz

Martin Bennauer, Christoph Schindler, Achim Degenhardt, Patrick Müller, Michael Schütz und Rüdiger Kutzner 837

Regionale Virtuelle Kraftwerke – Aufbau und Chancen –

Tobias Heß, Peter Schegner, Joachim Seifert und Jens Werner 845

Das europäische Übertragungsnetz – Anforderungen an den Betrieb einer kritischen Infrastruktur –

Joachim Vanzetta 857

Kohle als Rohstoff

Ressourcenschonendes Auskleidungsmaterial für Verbrennungs- und Vergasungsanlagen

Patrick Gehre und Christos G. Aneziris 867

Korrosion keramischer Filterkerzen bei der Vergasung von alkalireichen Brennstoffen

Sarah Schaafhausen, Elena Yazhenskikh und Michael Müller 879

Kohletrocknung/Trockenbraunkohle

Einsatz der druckaufgeladenen Dampfwirbelschichttrocknung (DDWT) bei Neubauvorhaben und der Modernisierung vorhandener Kraftwerksblöcke

Jürgen Willmann und Bernhard Pinkert 889

Entwicklung von Brennkammersystemen vom Labormaßstab in die Praxis am Beispiel einer Trockenbraunkohlefeuerung

Tao Wen, Lars Schwarzer, Michael Beckmann, Thomas Schmidt und Ronald Wilhelm 901

Druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-Trocknung (DDWT) von Braunkohlen – Grundlagenuntersuchungen zur verfahrenstechnischen Optimierung der Dampfwirbelschicht-Trocknung von Braunkohlen –

Matthias Merzsch, Joachim Posselt, Philipp Wiedemann, Stefan Lechner und Hans Joachim Krautz 923

Bestimmung der Reaktionskinetik und Methodik zur Vorhersage des Brennstoffumsatzes in Flugstromvergasern

Hartmut Spliethoff, Federico Botteghi, Mario Nakonz und Alexander Tremel 935

Energetische Biomassenutzung

Mitverbrennung von Solid Recovered Fuels mit hohem biogenen Anteil in Kraftwerken
Hans-Joachim Gehrmann, Jörg Maier, Franz-Josef Kipshagen, Piotr Nowak, Gudrun Pfrang-Stotz, Hanns-Rudolf Paur, Helmut Seifert und Thomas Glorius 947

Prozessorientierte Biomassebewertung
Daniel Bernhardt, Angelika Lyczkowska, Hans-Joachim Gehrmann, Tobias Seufert und Stefan Vodegel 961

Thermochemische Inkohlung von biogenen Reststoffen als Möglichkeit der technischen Kohleerzeugung
Christian Koch, Hellgard Richter, Ernst A. Stadlbauer und Reinhold Altensen 975

Optionen zur Erhöhung der Flexibilität von Kraftwerksfeuerungen
Hellmuth Brüggemann 989

Erfolgreiche feuerungstechnische Rehabilitierung des Blockes 6 des Kraftwerks Belchatow, Polen
Thomas Hilber und Hellmuth Brüggemann 999

Autorenverzeichnis 1011

Inserentenverzeichnis 1059

Schlagwortverzeichnis 1065

Perspektiven für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien

Michael Beckmann, Christoph Pieper, Reinhard Scholz und Marc Muster

1. Problemstellung ... 44
2. Wind ... 48
3. Photovoltaik (Solarzellen) ... 51
4. Biomasse ... 54
5. Wasser und Geothermie ... 56
6. Elektrisches Verteilernetz ... 56
7. Vollversorgung mit regenerativer elektrischer Energie ohne saisonale Vorsorge bzw. ohne Langzeitspeicherung ... 56
8. Übergangsphase ... 58
9. Langzeitspeicher ... 59
10. Vollversorgung aus erneuerbarer Energie mit saisonaler Vorsorge aus Langzeitspeicherung einschließlich synthetischer Gaserzeugung und Rückverstromung (Beispiel) ... 61
11. RDVEE – Regionale Demonstrationseinheit für eine Vollversorgung mit erneuerbarer Energie (Beispiel) ... 64
12. Ausblick ... 68
13. Literatur ... 68

Die Energieversorgung in Deutschland befindet sich in der Phase der beschlossenen Umstellung auf erneuerbare Energien, in der sich die Diskussion häufig auf die Umstellung der elektrischen Stromversorgung beschränkt. Für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien sind jedoch der gesamte Energiebedarf abzuschätzen und die Langzeitsicherheit der Energieversorgung zu betrachten. Um die Energieversorgung in Deutschland langfristig auf erneuerbare Energien umzustellen, ist der Weg zu einer wirklichen Vollversorgung mit realistischen Teilschritten und Zwischenzielen darzustellen. Anhand von regionalen Pilotprojekten kann demonstriert werden, ob der eingeschlagene Weg erfolgversprechend ist bzw. wie er ggf. korrigiert werden sollte.

1. Problemstellung

Der schrittweise Ersatz der fossilen Energieträger (Stein- und Braunkohle, Mineralöl, Erdgas) sowie der Kernenergie durch erneuerbare Energien ist ein Prozess, der seit etwa 20 Jahren andauert. Beim Primärenergieeinsatz ist der erneuerbare Anteil in Deutschland seit dem Jahr 1990 von etwa 1 % auf etwa 10,9 % im Jahr 2011 gestiegen [1, 2, 3]. Es gibt Perspektiven, die bis zum Jahr 2050 etwa 50 % oder sogar Vollversorgung (100 %) vorsehen [4, 5]. Daran wird deutlich, dass im Vergleich zu der bisherigen Entwicklung eine erhebliche Steigerung erforderlich ist, um das Ziel zu erreichen, selbst wenn man im Laufe der Jahre einen exponentiellen Verlauf der Zunahme der erneuerbaren Energien erwartet.

In vielen Bereichen der Gesellschaft wird der Umstieg auf erneuerbare Energien akzeptiert und gefordert. Dabei ist die Dimension der erforderlichen Anstrengungen größtenteils unklar und die zu unternehmenden Teilschritte sind nicht deutlich. Trotz des Begriffs *Vollversorgung* bleibt die Industrie häufig bei den Überlegungen unberücksichtigt. Darüber hinaus werden Langzeitspeichertechnologien zur Überbrückung von saisonalen Engpässen, während derer kaum oder sogar keine erneuerbare Energie (Wind, Photovoltaik) zur Verfügung steht, nicht hinreichend bedacht, obwohl bekannt ist, dass auch bei fossilen Energieträgern derzeit eine Bevorratung zur Stützung der Versorgung bei Engpässen besteht.

Nachfolgend werden die Größenordnungen der Substitution durch unterschiedliche Arten von erneuerbaren Energiearten dargestellt. Dazu werden abschätzende Überschlagsrechnungen unter Verzicht einer vollständigen Nomenklatur zur besseren Lesbarkeit durchgeführt. Basis der verwendeten Zahlenwerte sind im Wesentlichen die Zusammenstellung *Erneuerbare Energie in Zahlen* des BMU vom Juli 2011 [3] sowie die Vision des *Forschungsverbunds Erneuerbare Energien* (FVEE) zur Vollversorgung mit erneuerbaren Energien [4]. Die künftige Energieversorgung muss ein Energiemix aus allen dann verfügbaren Energiearten sein. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei, dass eine Vollversorgung ausschließlich über erneuerbare Energien sowohl die Industrie als auch die Versorgung aus einer Langzeitspeicherung für bis zu drei Monate umfassen sollte.

Für eine lange Übergangszeit wird eine Stützung durch fossile Energien erforderlich sein; am Ende der Entwicklung muss sie jedoch wegfallen können. Es reicht nicht aus, nur dieses Ziel und hierfür perspektivische Schritte zu formulieren. Vielmehr muss dargestellt werden, wie so genannte Meilensteine bzw. Wegmarken zu konzipieren sind. Dies betrifft auch eine erste Wegmarke, die aufzeigt, wie z.B. zunächst nur eine kleine Region voll zu versorgen ist. Nur anhand autarker Test- oder Pilot-Einheiten kann deutlich werden, wie ein vorgeschlagener Weg umgesetzt und nach mehrjähriger Erfahrung erfolgreich beschritten werden kann. Am Beispiel einer *Regionalen Demonstrationseinheit für eine Vollversorgung mit erneuerbarer Energie* (RDVEE) wird dies am Ende dieses Fachaufsatzes (siehe Abbildung 18) verdeutlicht.

Bei der allgemeinen Energiediskussion sind sowohl die Bereitstellungs- als auch insbesondere die Nutzerseite zu beachten. Neben der Verschiebung zu Gunsten des regenerativen Anteils (Substitution) im Laufe der Jahre muss auf der Seite der Nutzer von Energie (*Verbraucher*) weiterhin angestrebt werden, den absolut erforderlichen Energiebedarf (Endenergiebedarf) zu senken. In Abbildung 1 ist für Deutschland zunächst der absolute Primärenergiebedarf – derzeit etwa 13.500 PJ_{prim} bzw. 3.750 TWh_{prim} je Jahr mit einem Anteil von 10,9 % erneuerbarem Anteil – dargestellt.

Künftig soll nicht nur der prozentuale Anteil an erneuerbaren Energien erhöht, sondern auch der absolute Primärenergiebedarf vermindert werden (rechter Balken in Abbildung 1). Abbildung 2 zeigt, dass der letzt genannte Gesichtspunkt in den vergangenen 20 Jahren nicht erreicht worden ist. Zwar ist der regenerative Anteil von 1,3 % im Jahr 1990 auf etwa 10,9 % im Jahr 2011 gestiegen, der gesamte absolute Primärenergieaufwand ist jedoch

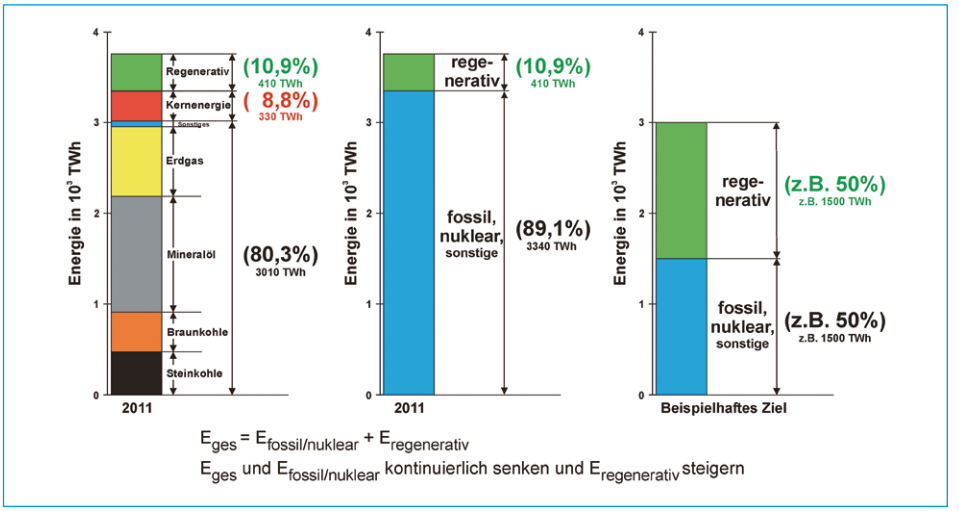


Abb. 1: Primärenergiebedarf in Deutschland

Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung, online verfügbar: http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html, zuletzt abgerufen am: 08.03.2012.

annähernd gleich geblieben und beträgt nach wie vor etwa 14 EJ = 14.000 PJ_{prim} bzw. etwa 3.900 TWh_{prim} = 3,9 • 10^6 GWh_{prim} je Jahr, was einer über das ganze Jahr gemittelten Durchschnittsleistung von etwa 444 GW_{mittel} = 444 • 10^3 MW_{mittel} entspricht. Diese Entwicklung bedeutet allerdings nicht, dass die Wirkungsgrade in den letzten Jahrzehnten nicht verbessert wurden, was gleichermaßen für die Prozesse der Energiebereitstellung (Kraftwerke usw.) und der Energienutzung (Industrie, Gewerbe, Handel, Verkehr, Haushalte usw.) gilt. Diese Verbesserungen sind seit langem ein stetiger Prozess, der nicht durch die aktuellen Modeworte *Effizienzsteigerung* oder *Effizienztechnologien* in Gang gesetzt worden ist. Der – jedenfalls bislang – etwa gleich bleibende Energiebedarf zeigt, dass Effizienzsteigerungen offensichtlich durch die steigende Nachfrage der Verbraucher kompensiert werden.

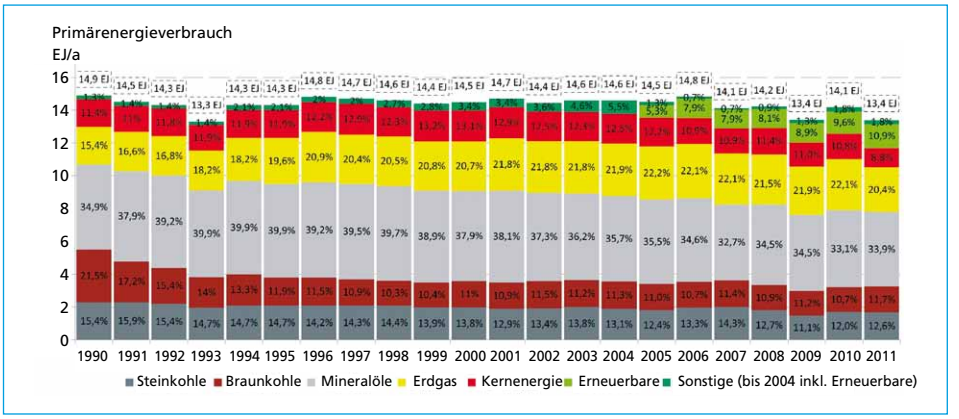


Abb. 2: Entwicklung des Primärenergiebedarfs in Deutschland seit 1990

Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung, online verfügbar: http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html, zuletzt abgerufen am: 08.03.2012.

In Abbildung 3 ist die anteilige Entwicklung der erneuerbaren Energien dargestellt sowie die in verschiedenen Studien prognostizierte künftige Entwicklung aufgezeigt.

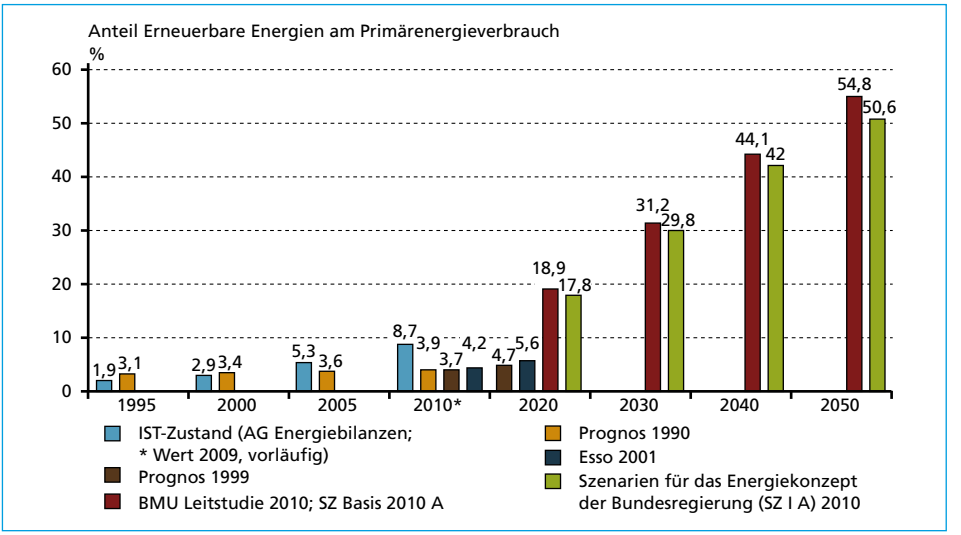
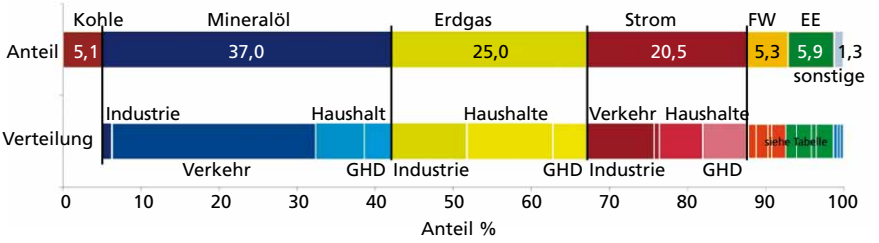


Abb. 3: Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergiebedarf

Quelle: Beckmann, M.; Pieper, C.: Erneuerbare Energien – Entwicklungen und Perspektiven in erneuerbare Energien, Band 5 (Hrsg. Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2011.

Die Primärenergie wird durch Umwandlung der verschiedenen Energieträger in Kraftwerken zu elektrischem Strom, in Raffinerien zu Flüssigbrennstoffen und in entsprechenden Aufbereitungsstufen zu Gasbrennstoffen umgewandelt, die den sog. Endenergiebedarf abdecken, der zur Nutzung in allen Bereichen unmittelbar zur Verfügung steht (siehe Abbildung 4).



Endenergieverbrauch 2010 in Deutschland	PJ	TWh	%	Kohle	Kraftstoff (Öl)	Gas	Strom	Fernwärme	EE	Sonstige
Industrie	2.542	706	28,1	4,4*	1,2*	9,6*	8,7	1,8*	1,1*	1,3*
Verkehr	2.557	710	28,2	0,0	26,1	0,1	0,7	0,0	1,3	0,0
Haushalte	2.581	717	28,5	0,5	6,2	11,0	5,6	2,0	3,2	0,0
GHD	1.381	383	15,2	0,1	3,5	4,3	5,6	1,6	0,2	0,0
Summe	**9.060**	**2.516**	**100**	**5,1**	**37,0**	**25,0**	**20,5**	**5,3**	**5,9**	**1,3**

* Summe nichtelektrischer, also chemischer Energie in der Industrie: 19,4 %

Abb. 4: Endenergiebedarf 2010 in Deutschland

Quelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung, online verfügbar: http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html, zuletzt abgerufen am: 08.03.2012.

Der Endenergiebedarf beträgt etwa 65 % des Primärenergieaufwandes, d.h. etwa 9.100 PJ_{end} bzw. 2.500 TWh_{end} je Jahr bzw. etwa 290 GW_{mittel} = 290 • 10^3 MW_{mittel} jahresgemittelte Durchschnittsleistung. Der Verlust von 35 % entsteht überwiegend durch die Erzeugung elektrischen Stroms in konventionellen Kraftwerken (mittlerer Wirkungsgrad derzeit etwa 40 % aus sog. Energiemix [1]). Aus dem unteren Teil der Abbildung 4 sind zugehörig zu der darüber liegenden Balkendarstellung weitere detaillierte Zahlenangaben zu entnehmen. So deckt z.B. der elektrische Strom derzeit etwa 21 % des Endenergiebedarfes ab.

Es wird nun häufig argumentiert, dass allein die Substitution des elektrischen Anteils durch Windenergie den Primärenergiebedarf in die Nähe des Endenergiebedarfes absenken würde, weil die elektrische Energie bei Windenergie direkt, d.h. mit einem Wirkungsgrad nahe 100 % erzeugt werde und entsprechende Verluste wie bei thermischen Kraftwerken nicht aufträten. Diese Einschätzung ist unzutreffend, weil bei einer Vollversorgung überwiegend mit Windenergie, Photovoltaik und Biomasse für die saisonale Überbrückung von Versorgungsengpässen (bis zu 3 Monaten) Energiemengen gespeichert werden müssen, die auf lange Sicht kaum mit elektrischen Batterien zu bewältigen sind. Elektrischer Strom wird für solche Zwecke wohl nur auf chemischem Weg (z.B. über synthetisches Methan, SNG) in Kavernen, Aquifer-Speichern o.ä. zu speichern sein. Hierbei entstehen Verluste bei der Gasherstellung (Wirkungsgrad z.B. 53 % – 60 %; bspw. Abbildung 12, [6]) wie auch bei der sog. Rückverstromung des Gases (Wirkungsgrad z.B. 51 % – 60 % [7]), wobei dann ein Gesamtwirkungsgrad von 27 % – 36 % als Verhältnis von der aus der Gasspeicherung *rückverstromten*, d.h. bereitgestellten elektrischen Endenergie, zu der z.B. über Wind hergestellten elektrischen Primärenergie angenommen werden kann. Auch bei regenerativen Energien wie Wind, Photovoltaik und Biomasse wird daher zwischen Primär- und Endenergiebedarf zu unterscheiden sein. Deshalb ist zunächst die Annahme plausibel, dass auch bei einer Vollversorgung mit regenerativer Energie die Substitution des derzeitigen Primärenergiebedarfes notwendig ist, wobei hierbei die Hoffnung besteht, dass der absolute Endenergiebedarf und damit auch der Primärenergieaufwand in der Zukunft signifikant gesenkt werden kann.

Die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung auf der Nutzerseite mit Auswirkungen auf den Endenergiebedarf sind in der Industrie begrenzt. In Deutschland wurden bei den sogenannten energieintensiven Industrien wie Chemie, Glas, Keramik, Zement, Eisen, Nichteisenmetalle usw. bereits bisher viele Prozesse optimiert, so dass sie mit einem Energiebedarf auskommen, der nur wenig über dem erforderlichen physikalisch-chemischen Minimum liegt. Die in dieser Hinsicht nicht nur verbesserten, sondern wirklich optimierte Prozesse lassen sich naturgesetzlich in ihrem Energiebedarf nicht mehr senken, obwohl dies ohne Kenntnis der Prozesse häufig gefordert wird. Beispielhaft sei erwähnt, dass der Energieaufwand zur Eisenerzreduktion in den letzten 60 Jahren halbiert wurde und seit etwa 20 Jahren asymptotisch verlaufend nahe am Optimum angelangt ist. In solchen Fällen müssten grundsätzlich neue Prozesse entwickelt werden, um den Energieaufwand noch weiter senken zu können. Eine solche Forderung ist zwar einfach, die Umsetzung ist jedoch in keiner Weise für die Einschätzung künftiger Entwicklungen überschaubar.

Nachfolgend wird ein anschauliches Bild von der gewaltigen Dimension der künftigen Aufgabe, den Energiebedarf durch erneuerbare Energien zu substituieren, dargestellt. Dabei werden jeweils *nur* die Größenordnungen verschiedener Energiearten und -verwendungsbereiche beschrieben.

Abbildung 5, das sich an dem Endenergiebedarf orientiert, zeigt die Aufteilung der Energien nach heutigem Stand und ist Ausgangspunkt der nachfolgenden Betrachtungen.

Schlagwortverzeichnis

A

Abbrandverhalten 906
Ablagerungen 455
  Charakterisierung 456
Ablagerungszusammensetzung 448
Absorber 178
Absorptions
  -enthalphie
    spezifische 264
  -geschwindigkeit 412
Additivscreening 411
ADELE-ING 803
adiabate Druckluftspeicher 749, 803
ADS-Brenner 134
Advanced Amine Process (AAP) 425
Alkalifreisetzungsreaktionen 446
Alkali-Metalle 879
Allwand-Feuerungssysteme 120
Altholz 962
Aluminiumoxid 867
Amine 411
  Film bildende 195
Ammoniak
  -schlupf 623, 634
  -wasser 629
Anfahrprozess 207, 253
Anhydritbildung 948
Anlagen
  -betrieb
    flexibler 205
  -flexibilisierung
    technische 238
  -planung 160
  -portfolio 159
  -starts 995
APROS 246, 247
Ascheschmelz
  -punkte 986
  -verhalten 968
Atomenergie 6
Ausbrandluft 1002
Auskleidungsmaterial
  für Verbrennungs- und Vergasungs-
    anlagen 867
Auslegung
  der CO_2-Wäsche und des
    CO_2-Verdichters 223
Auslegungs- und Einsatzoptimierung 166
Ausspeicherbetrieb 821
Axial-Doppel-Stufen-Brenner 134

B

Back-up
  -Kapazitäten 79
  -Kraftwerke 81
BAT 583
Bedarfsverschiebung 75
Beläge 455
Belags
  -bildung 959
  -eigenschaften 456
Beta-Absorptions-Verfahren 514
Betriebsflexibilisierung 777
Betriebsflexibilität 681
Betriebsgrenzen 220
Binary cycle 652
Binder-Phasen
  siliziumhaltige 879
Biomasse 54
  Mitverbrennung 994
Biomassebewertung 961
Blindleistungsbedarf 863
Braunkohlekraftwerk 238
  Boxberg R 141
Braunkohlenbrenner 993
Brenner
  -schwenkfunktion 995
  -technologie 989
Brennkammersysteme 901
  für staubförmige Brennstoffe 903
Brennstoffe
  alternative 994
  biogene 947
Brennstoff
  -ausnutzung 156
  -charakterisierung 940
  -ergänzungen 961
  -flexibilität 681
  -NO 133
  -qualitäten 351
  -wechsel 962
brennstofftechnische Charakterisierung 951
Brennwertformeln 967
Bromid 547
Bromid-Zugabe
  in den Feuerraum oder zur Kohle 537
Brüdenkondensationsverdampfer 897
BSCF-Membran 385
Bundesbedarfsplanung 92, 96
Bundesfachplanung 92, 97

C

Carbonat 411
Carbonate Looping Process 426
Carbonatlösungen
  wässrige 411
Carbon Capture and Conversion (CCC) 431
Carbon Capture and Utilisation (CCU) 429
Carbon Capture-Technologien 423
Carbonisierung 986
CCS-Technologien 261, 282, 335, 351, 889
CFD 610
Charakterisierung
  von Brennstoffen 949
Chemical Looping Process 426
Cheng-Prozess 646
Chilled Ammonia Process (CAP) 425
Chlor 954
Chlorkorrosion 954
ClaRaCCS 273
CO_2 als Einsatzstoff in der
  Düngemittelindustrie 430
  Methanolproduktion 430
  Methanproduktion 432
  Natriumkarbonatproduktion 431
CO_2
  -Abscheiderate 261
  -Abscheidung 214, 273, 351, 425
  -Emissionen des Kraftwerks
    spezifische 223
  -Löslichkeiten 411
  -Speicherung 433
    geologische 436
  -Verdichtung 214
  -Verdichtungsprozess 217
  -Wäsche 215, 399
    dynamische Simulation 261
  -Wäsche-Pilotanlage 401
    in Niederaußem 261
Combined Cycle 652
Compressed Air Energy Storage 816
CO-Verteilung 137
Cycle Optimized Operation of Plants 205

D

Dampf
  -bläser 475
  -erzeuger 141
    Stabilitätsberechnungen 309
  -erzeugerstabilität 311
  -injektion in die Gasturbine 644
  -kondensation 929
  -kraftwerke 837
    solarthermische 163
  -turbine 150, 837
  -turbinenregler 837
  -turbosätze
    für Geothermieanwendungen 649
  -wirbelschichttrocknung
    druckaufgeladene 889
    von Braunkohlen 923
druckaufgeladene Dampfwirbelschicht-
  Trocknung (DDWT) 889, 923
    Pilotanlage 892
    Technologie 893
Degradation 411
Desorptionsenthalpie 411
Direct Cycle 651
Druck
  -behälter 750, 753
  -drahtnetzreaktor 939
  -flugstromreaktor 938
  -luftspeicher 803, 815
    adiabate 749, 803
  -pulsationen 295
  -speicher 754
  -verlust
    des Speicherinventars 782
  -verlustminderung 620
Dynamiksimulationen 245
Dyncap 273

E

Echtzeitsimulator 837
Economiser
  -Heizfläche 150
  -Stabilität 317
EEG-Umlagezahlung 77
Einspeicherbetrieb 821
Einspeisung
  vorrangige 76
Elektrizitätsversorgung
  Aufbau und Struktur 858
Emissionen
  staubförmige 511
E-Mobility 847
Energie
  -bedarf 43
  -effizienzsteigerung 149
  -handel 860, 862
  -infrastruktur 39, 90
  -markt 240

-politik 159
der Europäischen Union 3
in Tschechien 4
-speicher 815
-speicherung 436, 795
mit LOHCs 796
-wende 88
Chancen und Herausforderungen 33
-wirtschaft
der Europäischen Union 8
Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) 88
Energiezentrale Forsthaus 107
Engpassmanagement 861
Entladedynamik 752
Entnahmeleistung 752
EnWG 87
Erdgasnetze 434
Ermüdungs
-analyse 295
-risswachstumsberechnungen 211
erneuerbare Energien 6, 43, 737, 829
Ausbau 35
Integration in den Strommarkt 36
Ertüchtigung 131
EU-Energiepolitik 3
EU-Energiewirtschaft 8
EU-Projekt RECOMBIO 948
Exergieverluste 754

F

Fernwärme 766
Fernwärmezentrale 114
Feststoffwärmespeicher 777, 808
Feuerfestmaterial 868
Feuerlagen 313
Feuerung 285
Feuerungs
-optimierung 121
-systeme 990
FIELD-Rohr 906
Filteraschen 960
Flexibilisierung 82, 207, 285, 785
der Stromerzeugung 832
Möglichkeiten und Grenzen 237
Must-Run-Kapazitäten 778
von GuD-Kraftwerken 777
Flexibilität 167, 238, 273
Anforderungen 80
an den fossilen Kraftwerkspark 71
Steigerung 213
von Kraftwerksfeuerungen 989
Flugaschen
Haftwahrscheinlichkeit 493
Unverbranntes 358
Flugstromvergaser
Brennstoffumsatz 935
Fluid-Struktur-Interaktion
bei Druckpulsationen
in Rohrleitungssystemen 295
Fluor 537
Friction Coupling 297
Frischlüfter 123
Fuel-Saving-Mode 709
Funktionstest 839

G

Gasmotoren 759
Gasspeichertypen
geologische 437
Gasturbine 639
Dampfinjektion 644
Gasturbinen 681, 777
Gas- und Dampfkombikraftwerke (GuD) 111, 703, 815
Genfer Luftreinhalte-Konvention (UNECE) 524
Geothermie 56, 649, 737
-dampfturbine 656
-kraftwerke 650
Gewebefilter
Auslegung 347
Merkmale 346
SO_3-Minderungsstufe 335
GiD-Prozess 639
Grid Code 837
Großenergiespeicher 813
GuD-KWK-Anlagen
Flexibilisierung 778

H

Haftraten
von Flugaschepartikeln 491
Hardware-in-the-Loop-Test 837
Harnstofflösung 629
Heißgasreinigung 879
Heizflächen
Verschlackungs- bzw. Verschmutzungstendenzen 493
Heizwertformeln 967

HKW Lichterfelde
Optimierung der Regelung 225
HKW Mannheim 149
Hochdruckverdichter 806
Hochspannung 858
Höchstspannungsleitungen 89
Beschleunigungspotenzial
beim Ausbau 101
Hochtemperatur
-Druckflugstromreaktor 935
-Filterkerzen
Binder-Phasen 879
keramische 879
-Isolierung 756, 808
-Membranen 378
-Wärmespeicher 777
Holzhackschnitzel 950
Holzheizkraftwerke 111, 962
Hybridisierung fossiler Kraftwerke 716
hydrothermale Carbonisierung (HTC) 975

I

IED 538
IGCC-Anlagen 935
Importkohlen 591
Indirect Cycle 651
Industrieprozesse
Freisetzung von Quecksilber 521
Infrarot-Kamerasystem 470
Inkohlung
von biogenen Reststoffen 975
Inkohlungs
-diagramm 984
-grade 986
-verfahren
thermochemisches 975
Innovation
technische 13
Innovationsdynamik 14
in-situ Messung 511
Inspektionsintervalle 210
Instabilität von Dampferzeugern 311
Integrated Solar Combined Cycle (ISCC) 703
integrierter Gas-Dampf-(GiD)-Prozess 639
ISCC-Technologie 703
isobares GuD 815
Isobaric Adiabatic Compressed Air Energy
Storage – Combined Cycle 815

J

Junction Coupling 297

K

Kaverne 751
Kernenergieausstieg 78
Kernkraftwerk-Moratorium
Auswirkungen 863
Kessel
-aschen 960
-reinigung 469
Kohle 539
-banderweiterung 119
-erzeugung
technische 975
-kraftwerke
Quecksilber 519
Quecksilber-Emissionen 497
-mahlanlage 122
Koks
-reaktivität 936
-vergasung 937
Kompressor 750
Kondensatstau 255
Korrosion 145, 455, 654, 867, 879
keramischer Filterkerzen 879
Korrosionsbeständigkeit 867, 874
Korrosions- und Verschlackungsgefahr 443
Korrosionsverhalten 972
Korund 879
Kraft-Wärme-Kopplung 80, 759, 785,
846, 948
Kraftwerke
solarthermische 703
thermische 159, 827
Kraftwerks
-fahrweise
flexibilitätsorientierte 223
-feuerungen
Erhöhung der Flexibilität 989
-konzeption 161
-optimierung 164
-park 73
-prozess 214
Kurzschluss
kraftwerksnaher dreipoliger 837
KWK-Anlagen 39
Wirtschaftlichkeit 80
KWK-Wärmespeicher 790

L

Ladungsübertragungsverfahren 513
Langzeitspeicher 59
Lanzenschraubbläser 475
Lasermesssystem 189
Laserscanning 188
  hochauflösendes terrestrisches 185
Last
  -absenkung 689
  -änderungsgeschwindigkeit 148
  -flexibilität 82, 240
  -ganganalyse 785
  -wechsel bei CCS-Prozessen 261
Leistungssteigerung 119
Leittechnik 225, 838
Liquid Organic Hydrogen Carrier 795
LOHC-Technologie 797
Low-NO_x Brenner für Schweröl 134
Low NO_x-Strahlbrenner 1001
Luftzerlegung 280
  kryogene 323
  membranbasierte 377

M

Marktpreisbildung 76
Massenumsatzrate 951
MATS 538
MEA-Lösung 262
Membranen
  tubulare 386
Mercury and Air Toxics Standards 537
Merit Order 237
Merit-Order-Modell 76
Methanlinie
  der PGP-Technologie 435
Mikrogasturbinen 661
Mikro-KWK-Anlagen 846
Mindest
  -betriebszeiten 82
  -kohlefeuer 82
  -last 82, 992
    technische 311
  -lastfahrweise 82
  -stillstandszeiten 82
Mineralumwandlung in Dampferzeugern
  Simulation 443
Minutenreserve 226, 689
Mittelspannung 858
Mitverbrennung
  in Kraftwerksprozessen 947
  von Biomasse 994
  von Ersatzbrennstoffen mit Biomasse 955
  von Ersatzbrennstoffen mit hohem biogenen Anteil 947, 952
Monoethanolamin (MEA) 262
Mühlenumbau 123
Mullit 879
Müllverbrennungsanlage 111
Munich Center for Technology in Society (MCTS) 26
Must-Run-Problematik 78

N

NABEG 87
Nettowirkungsgrad 278
Netz
  elektrisches 837
  -ausbau 37, 88
  -ausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz (NABEG) 88
  -belastungen durch Windstrom 863
  -betrieb
    dynamischer 688
  -engpässe 862, 864
  -entwicklungsplanung 91, 95
  -stabilität 784, 837
  -vorschriften 837
NH_3-Schlupf 623, 634
Niederspannung 858
Niedertemperaturkonvertierung (NTK) 976
NO_x-Abscheidung 623
NO_x-armer Brenner 134
NO_x-Emissionen 131, 360, 599

O

Oberluftsystem 135
Octadecylamin 198
Offshore
  -Windenergie 736
  -Windpotenzial 736
On-load Kesselreinigung
  intelligente 469
Onshore-Windenergiepotenzial 729
Optimierung 291, 616
Organic-Rankine-Cycle 740
OTC-Geschäfte 860
Oxy-Combustion-Prozesse 425

Oxyfuel 273
-Bedingungen 367
-Dampfkraftwerk 377
-Forschungsanlage 169
Schwarze Pumpe 170
-Konzepte
membranbasierte 380
-Pilotanlagen 351
in Schwarze Pumpe 353
in Windsor (CT), USA 353
-Verfahren 323, 335
-ZWSF 331
Oxy-Vac-Jül-Konzept 380

P

Parabolrinnen-Kollektor 704
Partikelgitternetzsonde 369
PCC 273
PCC Pilotanlage 399
Pflanzenkohlen 986
PGP-Technologie 434
Photovoltaik 51, 847
Planfeststellung 94, 100
Poisson Coupling 297
Pollutant Release and Transfer Register (PRTR; Aarhus-Konvention) 523
Polyamin 196
Post Combustion Capture Technologie (PCC) 213, 273, 399
Post-Combustion-Prozesse 425
Power-Boosting-Mode 709
Power to Gas to Power Technologie (PGP) 433
Primär
-maßnahmen 132
-regelung 255
Prozesssimulation
instationäre 245
Prüfkonzepte 205
Pulsationsdämpfer 306
Pumpspeicherkraftwerke 37
Punktwolke 188
PV-Eigenverbrauchssysteme 788
PV-Einspeisung 862

Q

Qualitätssicherung 144
Quecksilber 547
-abscheidung
bromgestützte 537
Effizienz 498
-einträge
in die deutschen Oberflächengewässer 530
-emissionen 497
nationale 523
-kreislauf 520
-oxidation 501
-strategie 519

R

Radialturbine 669
Rauchgas
-kanal 614
-reinigung
nach einem Oxyfuel-Dampferzeuger 335
Optimierungen 174
-rezirkulation 136, 325, 330
-rezirkulationsrate 280
Reaktionsfrontgeschwindigkeit 951
Reaktionsrohr nach FIELD 906
Redispatch 74
Reduktionsmittel 603
Reduzierung der NO_x-Emissionen 132
Reflektormarken 189
Regel
-energie 273
-energiemarkt 37
-geschwindigkeit 226
-leistung 79
-verhalten 231
stabiles 837
-zonen
der Übertragungsnetzbetreiber 858
Regelungskonzepte 837
Regeneration
Energiebedarf 415
Regeneratorspeicher 750, 752
regionale virtuelle Kraftwerke 845
Rehabilitierung
feuerungstechnische 999
Reinigung 456
Residuallast
-folgefahrweise 76
-verlauf 787
Riss
-fortschrittsanalysen 210
-initiierung 208

Rohkohlemineralien 444
Rohrleitungssysteme 295
Rost
  zum Einsatz von Biomasse 994
  -feuerung 955
Rußbläser 475

S

Sammler
  isokinetisch absaugende
    gravimetrische 511
Sauerstoffzahl im Oxyfuel-Prozess 324
Schädigungstoleranzanalyse 212
Schichtwärmespeicher 822
Schlackenstein 867
Schleierluftgebläse 605
Schnellstartfähigkeit 207
Schraubbläser 475
Schüttspeicher 750
Schwachlast
  -automatik 230
  -bereich 225
  -fähigkeit 309
  -fahrten 995
  -schieber 228
Schwefel-Chlor-Verhältnis 972
Schwenkbrenner
  für Steinkohle 991
Schweröl-Brenner 139
Schwingungszustände 295
SCR-Anlage 612
Sekundär
  -brennstoffe 954
  -maßnahmen 133
  -regelleistung 226
Simulation 286, 414
Simulationswerkzeug
  für Verschmutzungs- und
    Verschlackungsphänomene 451
Single Flash Wasser-Dampf-Kreislauf 651
Sinteratmosphäre 871
Slagging-Index 971
Smart Grid 24
SNCR-Technologie 623
  an Großkesseln 599
SO_2-Abscheidegrad 176
SO_3-Abscheidung
  an einem Gewebefilter 335
Solar
  -feld 164
  -kessel-Konzept 719
  -kraftwerke 719
  -wärme
    Integration in GuD-Kraftwerke 703
Solid Recovered Fuels (SRF) 948
Sonnenenergie
  großtechnische Nutzung 719
Spannbetonbehälter 753
Spannungs
  -ebenen 859
  -risskorrosion 146
Speicher 751, 795, 803, 847
  Kannibalisierung 785
  Wechselwirkungen 789
  -dichten 795
  -nutzungsgrad 753
  -problematik 37
  -technologien 75, 437, 827
  -wirkungsgrad 750, 799, 819
Speicherung
  thermische 725
  thermischer Energie in KWK Anlagen 763
  von Energie in Form von Wasserstoff 799
Spitzenlastkessel 114
Stabilität
  dynamische 313
Stabilitätsberechnungen
  dynamische 315
  statische 314
Stadtwerke 159
Start-Stopp-Vorgang 82
Stäube 960
Staubemissionen
  Messung 509, 515
Stickstoff
  -oxide 360
  -quellen 132
Stillstände 163
Stillstandsverhalten 755
Streulichtverfahren 512
Strombörsen 860
Stromhandel 88, 853, 863
Stromleitungen 88
Strommarkt 243
Stromnetz 857
  -ausbau 7, 87
Strompreise
  negative 36
Stromspeicher 749
  funktionaler 785
Strömungssimulation 617
Strömungsungleichverteilung 754

T

T24-Schweißnähte 147
Tankwärmespeicher 822
Taupunktunterschreitung 517
Technologiemix 79
Teillastbetrieb
  von Dampfkraftprozessen
    mit CO_2-Abtrennung 273
Temperatur
  -messsystem 602
  -schieflagen 623
  -verteilung
    im Feuerraum 605
  -wechsel 867
Temperatur- und Wärmestromdichte-
    messsignale 456
thermisches NO 132
Thermoschockbeständigkeit 871
Tiefengeothermie 738
Topologieoptimierung 610
Transmissionsverfahren 512
Transportnetz 858
Trianel-Entscheidung 103
triboelektrisches Verfahren 516
Trockenbraunkohlefeuerung 901
Trockenkohle 891
Trockensorption 335
  mit Gewebefilter 335
Trockner 891
Trocknungsverhalten 925
Tschechien 4
Turbine 751
TWIN-NO_x-Verfahren 623

U

Übertragungsnetz 89
  europäisches 857
Übertragungsnetzbetreiber 857
Umwelt-Rechtsbehelfsgesetz 103
Umweltverbandsklagen 103
Unverbranntes
  in der Flugasche 358
USA 537

V

Verbandsklagemöglichkeiten 103
Verbrennungsaerosole 957
Verbundnetz 839
  europäisches 859
Verdampfer
  Stabilität 313
Verdampferspirale 311
Vergasung 935
  von alkalireichen Brennstoffen 879
Vergasungsanlagen 867
Verschlackungen 443, 485
Verschlackungs
  -potential 959
  -risiko 36
    Abschätzung 443, 971
  -vorgänge 367
Verschmutzungen 443, 455, 485, 962
Verschmutzungs
  -neigung 36
  -vorhersage 443
Versorgungssicherheit 74, 243, 857
Verteilernetz
  elektrisches 56
Verteilraumgestaltung 754
Verteilstabilität
  statische 312
Verteilungsnetz 858
Vollversorgung
  mit erneuerbaren Energien 43

W

Wanderrost 1003
Wärmedurchgangswiderstand
  des Belags 493
Wärmelastschwankungen 639
Wärmeleistung 753
Wärmepumpen 847
Wärmespeicher
    724, 749, 777, 785, 815, 822
Wärmespeicherung 759
Wärmestromdichtemesssignale 456
Warmstart 252
Waschmittel 411
  -kühler 265
  -umlaufrate 403
Wasserenergie 56
Wasserlanzenbläser 475
Wasserstofflinie
  der PGP-Technologie 435
Wasserstoffträger
  flüssige organische 795

Werkstoff
-schwierigkeiten 147
-sonde 180
Windenergie 48, 847, 862
Windenergiepotenzial 729
Windgeschwindigkeiten 731, 733
Windleistungsprognose 863
Windturbinen 729
Wirbelschicht 285
Wirbelschichttechnik 325
Wirkungsgrad 278
Wirkungsgradsteigerung 646

Z

Zersetzungsverhalten von Biomasse
thermisches 976
zirkulierende Wirbelschichtfeuerung 323
Zukunftsfähigkeit 13
Zünd
-ofen 904
-rate 951
-verhalten 904
Zwangsdurchlaufkessel 142