Michael Beckmann Antonio Hurtado

KRAFTWERKSTECHNIK

– Sichere und nachhaltige Energieversorgung –

Band 3



Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Kraftwerkstechnik
Sichere und nachhaltige Energieversorgung – Band 3
Michael Beckmann, Antonio Hurtado.
– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011
ISBN 978-3-935317-72-6

ISBN 978-3-935317-72-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

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

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2011
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, 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.

Inhaltsverzeichnis

Konzept der Bundesregierung

Die Energiewende ist eine Chance für Deutschland

Katherina Reiche 3

Pilot- und Neubauprojekte in der Kraftwerkstechnik

Paradigmenwechsel bei der Technologieauswahl in der Kraftwerkstechnik

Uwe Lenk 9

Gestaltung der CO_2-Anlage eines Oxyfuel-Demonstrationskraftwerkes

Roland Ritter und Torsten Stoffregen 25

Modernisierung der 360 MW_{el}-Blöcke mit Braunkohlefeuerung im Kraftwerk Bełchatów

Bernhard Pinkert, Frank Schierack, Ralf Peter und Krzysztof Matyskiewicz 37

Erfahrungen aus dem Testbetrieb der Oxyfuel-Forschungsanlage von Vattenfall und Ausblick zur Oxyfuel-Technologie

Uwe Burchhardt, Steffen Griebe, Helge Kass,
Rainer Giering und Robert Preusche 51

Technisch/wirtschaftliche Optimierung der Integration einer Wirbelschichttrocknungsanlage für Braunkohle in den Kraftwerksprozess

Toni Rupprecht 73

Erforschung eines alternativen Verfahrens zur CO_2-Aufbereitung in einem braunkohlegefeuerten Oxyfuel-Kraftwerk

Stephanie Tappe, Jinying Yan, Gunnar Langner,
Thomas Porsche und Göran Lindgren 87

CCS-Technologien

Untersuchung von Lausitzer Braunkohle an einer 15 MW_{th}-Oxy-Pilotanlage mit Tangentialfeuerung
Frank Kluger, Patrick Mönckert, Thomas Wild, Armand A. Levasseur, James Kenney und David G. Turek 101

Kreislaufelemente bei einer 50 kW_{th}-Braunkohlestaubfeuerung unter Oxyfuel-Bedingungen
Christopher Thiel, Daniel Bernhardt, Martin Pohl und Michael Beckmann 117

High pressure oxyfuel process with staged combustion
Hanno Tautz 133

Chancen und Risiken der geologischen CO_2-Einlagerung bzw. -speicherung
Jochen Großmann und Andreas Dahmke 139

OXYCOAL-AC: Schwefeleinbindung in Oxyfuel-Rauchgasen
Arno Kellermann, Malte Förster und Reinhold Kneer 149

Schwefeloxidkonzentrationen bei Kohlenstaubfeuerung im Oxyfuel-Betrieb
Reinhold Spörl, Malgorzata Stein-Brzozowska, Jörg Maier und Günter Scheffknecht 155

Zu erwartende Begleitstoffkonzentrationen im abgeschiedenen CO_2-Strom eines Oxyfuel-Prozesses und deren korrosive Auswirkungen auf Pipeline- und Verdichterwerkstoffe
Benedikt Paschke, Sven Kownatzki und Alfons Kather 173

Einfluss der Betriebsparameter der CO_2-Abtrennung mittels MEA-Wäsche auf den Regenerationsenergiebedarf
Jewgeni Nazarko, Alexander Otto, Ernst Riensche, Michael Weber, Ludger Blum und Detlef Stolten 183

Aminwäsche-Testanlage am Kraftwerksstandort Heilbronn als Teil der EnBW CCS-Strategie
Arnim Wauschkuhn und Sven Unterberger 199

Betriebsergebnisse nach Abschluss des ersten Versuchsprogramms der PCC Pilotanlage in Niederaußem
Frank Rösler, Torsten Stoffregen, Peter Moser, Sandra Schmidt, Georg Sieder und Hugo Garcia 209

Entwicklung, Erprobung und Simulation neuartiger Absorbentien für Post Combustion Capture Prozesse
Sven Multhaupt, Gerd Oeljeklaus, Peter Behr, Klaus Görner, Thomas Riethmann, Alexander Schraven und Daniela Kruse 219

Gas- und Dampfturbinen

15 Jahre Betrieb des Heizkraftwerk Dresden Nossener Brücke – Vorbereitung und Durchführung lebensdauerverlängernder Maßnahmen für die 2. Betriebsperiode –
Stephan Jeglinsky und Axel Pechstein 229

Dezentrale Energieversorgungssysteme mit hochflexibler Kraft-Wärme-Kopplung und deren Regelung
Ingo Assmann 237

Combined Cycle Power Plants as ideal solution to balance grid fluctuations – Fast Start-up Capabilities –
Christoph Ruchti, Hamid Olia, Karsten Franitza, Andreas Ehrsam and Wesley Bauver 247

Dampfturbinen für den flexiblen Lastbetrieb in modernen Kohlekraftwerken
Michael Wechsung, Carsten Gräber und Heiko Lemmen 263

Verschlackung und Korrosion von Dampferzeugern

Effektiver Korrosionsschutz von Feuerraumwänden bei der Modernisierung von steinkohlenstaubgefeuerten Dampferzeugern zur primärseitigen NO_x-Minderung
Markus Rogg, Tobias Kühnle, Thomas Sabel, Johannes Hees und Hans-Ullrich Thierbach 279

Einfluss der Kalkqualität auf die Verschmutzungsneigung von Kesselheizflächen und des Rauchgastraktes – Eine brennstoffchemische Bewertung –
Sven Wenzke, Bernd Lipinski und Helmut Ziehe 291

Kontinuierliche Prozessoptimierung durch den Einsatz intelligent ausgeführter On-load Kesselreinigung
Daniel Bartels, Dirk Hadder, Christian Mueller, Manfred Frach, Antti Kommulainen, Thomas Brunne und Stefan Wenke 301

Einfluss von Wärmestromdichte und Eigenschaften des Schweißguts auf die Abzehrung von Schweißungen
Thomas Herzog, Dominik Molitor und Wolfgang Spiegel 321

Regenerative und dezentrale Energieversorgungssysteme

Modernisierung eines GuD-Kraftwerkes zur Optimierung der Fernwärmeversorgung der Stadt Halle
Stephan Krein und Matthias Krause 339

Wärmerückgewinnung ungenutzter thermischer Energie aus Rauchgasen in Biomassekraftwerken mittels innovativem CEECON-Konzept
Daniela Hoffmann 345

Biomasse-Mikro-KWK: Eine Bestandsaufnahme
Tobias Zschunke, Roman Schneider, Bert Salomo und Jutta Pfitzner 353

Gasreinigung

Primär-NO_x-Regelung und -Einsenkung in Kombination mit – durch Online-CFD – temperaturgeführter SNCR im steinkohlebefeuerten Großkraftwerk
Alexander C. Hanf 365

Neue Dimensionen für SNCR-Anlagen an Kraftwerkskesseln Wo liegen die Grenzen des SNCR-Verfahrens aus heutiger Sicht?
Thomas Reynolds, Zoltan Teuber und Karlheinz Huber 377

Trends und Entwicklungen von SCR-Katalysatoren für die moderne Kraftwerkstechnik
Wolfgang Schüttenhelm 387

Solarkraftwerke

Hochleistungsdampfturbinen für solarthermische Kraftwerke
Mark A. Schwarz, Thomas Polklas, Christian Tümmers, Klaus Behnke und Michael Witt 403

Auswirkungen verschiedener technischer Parameter auf Einsatzmöglichkeiten und Ertrag solarthermischer Parabolrinnenkraftwerke
Aiko Vogelsang und Ilja Tuschy 411

Solar Topping von Dampfkraftwerken
Christoph Guder und Dirk Neumann 423

Windenergie

Chancen für den Export deutscher Windkrafttechnologien
Nils Borstelmann 433

Die Verdichtung von bestehenden Windparks
Janko Geßner 441

Wirtschaftlichkeit von Offshore Windparks in Deutschland unter Berücksichtigung von Erfahrungen aus dem Testfeld alpha ventus – Konsequenzen für die Offshore Windenergie –
Jörg Buddenberg, Wilfried Hube und Claus Burkhardt 449

Sonne, Wind und Wellen – Natürliche Grenzen erneuerbarer Energien im Erdsystem
Axel Kleidon, Fabian Gans, Lee Miller und Ryan Pavlick 463

Netze und Netzstabilität

Dezentrale Energie – Netzstabilität
Werner Brinker und Enno Wieben 473

Technische Herausforderungen des GB Grid Codes
Reiner Puls und Henning Zindler 489

Instationäre Kraftwerkssimulation unter Einbezug der Regelungstechnik mit Modelica
Sebastian Meinke, Jürgen Nocke, Egon Hassel, Christian Ziems und Harald Weber 501

Optimierte Dampfturbinenregelung zur Beherrschung von Mehrfachstörungen im elektrischen Netz
Christian Kreischer, Jens Rosendahl, Stefan Kulig, Martin Bennauer und Heribert Werthes 515

Speicher

Salzkavernen als Großspeicher für fossile und Erneuerbare Energien
Manfred Wohlers 523

Bewertung von Speicherkraftwerken im liberalisierten Strommarkt
David Gunkel, Friedrich Kunz, Dominik Möst und Alexander von Selasinsky 539

Thermopotentialspeicher – Energiespeicher der Zukunft?
Conrad Schulz, Frederick Jahns und Sebastian Spieker 553

Systemtechnische Bedeutung von hocheffizienten KWK-Anlagen in Verbindung mit Kurzzeit-Wärmespeichern
Marcus Dribbisch, Anders J. W. Hedbäck und Christian Höfurthner 565

Adiabate Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung
Stefan Zunft, Michael Krüger, Roland Marquardt, Frank Buschsieweke, Peter Moser, Mathilde Bieber, Konrad Eichhorn Colombo, Christoph Niklasch, Peter-Michael Mayer, Michael Klafki und Andreas Bannach 579

Kohle als Rohstoff

CO_2-arme Kohlechemie für das Nach-Erdöl-Zeitalter
Bernd Meyer, Stefan Murza und Robert Pardemann 593

Strukturaufklärung und Werkstoffentwicklung für innovative Vergasungsverfahren
Heiner Gutte, Daniela Bauer und Patrick Gehre 601

Neue Werkstoffe für den Einsatz in Verbrennungs- und Vergasungsanlagen
Patrick Gehre, Claudia Wenzel und Christos G. Aneziris 611

Strukturaufklärung von Energierohstoffen
Matthias Otto, Daniela Bauer, Philipp Rathsack, Denise Reichel und Mirjam Schmidt 623

Braunkohlebrikettstrang als alternative Zuführung für druckaufgeladene Vergasungsprozesse
Alexander Rosin, Volker Herdegen, Hans-Werner Schröder und Jens-Uwe Repke 635

Messtechnik

Opto-akustische Untersuchungen an industriellen Thermoprozessanlagen Verbundprojekt VIBRATHERM – Diagnosesystem und Verbrennungsregelung mit akustischer und optischer Brennraumüberwachung
Werner Vieweg und Andreas Günther 647

Ertüchtigung von Probenahme und Instrumentierung im Wasser/Dampf-Kreislauf im Hinblick auf die Flexibilisierung der Fahrweise
Manuel Sigrist 661

Innovative Messtechnik zur kombinierten Korrosions- und Materialforschung im Kraftwerksbereich
Christian Deuerling und Barbara Waldmann 669

Prozesssimulation

Transiente Berechnung thermomechanischer Schädigung dickwandiger Bauteile im 700 °C-Kraftwerk durch Anfahrvorgänge
Christian Schuhbauer, Helmut Tschaffon, Frank Kluger und Hartmut Spliethoff 683

Kohlekraftwerke im Energiemix mit den erneuerbaren Energien – Der Schwachlastbetrieb und seine Auswirkungen auf das Kohlekraftwerk –
Michael Nolte, Hermann Brüggendick und Klaus Brosch 699

Modellierung der Mineralumwandlung bei der Kohleverbrennung
Martin Strelow, Adrian Magda, Ioana Magda, Horst Müller und Reinhard Leithner 709

Autorenverzeichnis 721

Inserentenverzeichnis 761

Schlagwortverzeichnis 767

Pilot- und Neubauprojekte in der Kraftwerkstechnik

Paradigmenwechsel bei der Technologieauswahl in der Kraftwerkstechnik

Uwe Lenk

1. Grenzen numerischer Modelle zur Technologiebewertung 11

2. Neurodidaktischer Lösungsansatz 13

3. Anwendungsbeispiele und Diskussion 18

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung 21

5. Literatur- und Quellenverzeichnis 22

In der Vergangenheit waren die Entscheidungen zur Technologieauswahl in der Energiewirtschaft stark technisch geprägt und an der Versorgungssicherheit orientiert (Abbildung 1). Nach der ersten Ölpreiskrise 1973 und der Zweiten in Folge der iranischen Revolution 1979 war die Kernenergie auch aus energiepolitischer Sicht sehr attraktiv. Uran hat eine sehr hohe Energiedichte, sodass bereits relativ kleine Mengen zur Stromproduktion für einen langen Zeitraum genügen. Versorgungssicherheit und damit Unabhängigkeit von Energielieferungen aus dem Ausland zu erlangen, war die Zielsetzung.

Nun ist es rund vier Jahrzehnte her, dass Deutschlands Straßen wegen der Ölpreiskrise völlig leer waren. Der letzte Sonntag mit Fahrverbot war am 9. Dezember 1973. Auch die Verunsicherung der Entscheidungsträger durch den Bericht des Club of Rome *Die Grenzen des Wachstums*, der einen engen Zusammenhang zwischen der Endlichkeit der natürlichen Ressourcen und der Unmöglichkeit dauerhaften Wirtschaftswachstums aufzeigte, sind Geschichte [1]. Das Angebot an fossilen Energieträgern ist heute und wahrscheinlich auch noch weiterhin ausreichend.

Als Nächstes führten Liberalisierung, Deregulierung und Wettbewerb in der Energiewirtschaft zu grundlegenden Veränderungen bei der Technologieauswahl (Abbildung 1, mittlere Spalte). Durch die Trennung von Stromerzeugung, Übertragung und Verteilung bildete sich ein neues, anders strukturiertes Umfeld. Es mussten neue Aufgaben, Risiken und unternehmerische Möglichkeiten im Energiehandel, bei der Durchleitung und Abrechnung beachtet werden. Auch der Zielkonflikt zwischen der, als Vorsorge gegen den Treibhauseffekt geforderten Abtrennung der Kohlendioxidemission bei der Kohleverbrennung und der fehlenden Akzeptanz zur Einlagerung des Kohlendioxides muss berücksichtigt werden.

Zusätzlich sind die Unternehmen der Energiewirtschaft keine rein wirtschaftlich orientierten Gebilde. Sie haben auch grundlegende gesellschaftliche und soziale Aufgaben zu erfüllen. Hierbei sind Fragen zum Engagement in Gesellschaft, Wirtschaft und Politik sowie zu Verhaltensweisen im Umgang mit Mitarbeitern, Kunden, Kapitalgebern, Lieferanten, Wettbewerbern und der Öffentlichkeit zu beantworten (Abbildung 1, rechte Spalte). So entsteht ein mehrdimensionales Entscheidungsproblem mit technischen, wirtschaftlichen und sozialen Einflussgrößen [2].

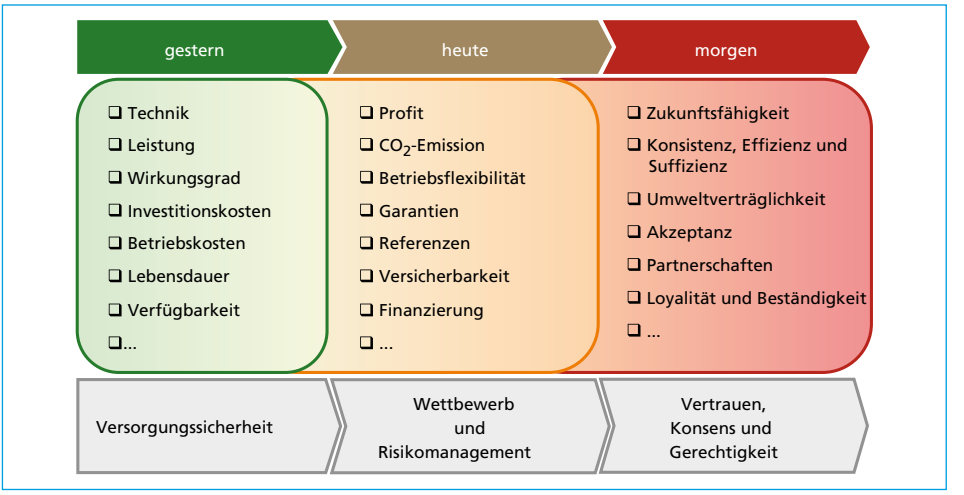


Abb. 1: Anstieg von Komplexität und Unsicherheit bei der Technologienentscheidung

Quelle: In Anlehnung an die Darstellung von P. Klüsener, U. Lenk, Life Cycle Costs: Einzige Entscheidungsgröße? Leverkusen 2002

Die hohe Dynamik bei der Entwicklung im politischen, wirtschaftlichen, technologischen und sozialkulturellen Bereich wie zum Beispiel Klimawandel, CO_2-Abtrennung, Stuttgart 21, KKW-Laufzeitverlängerung, Bürgerkrieg in Nordafrika, E10 Benzin, KKW-Unfall in Fukushima, Atom-Moratorium, Landtagswahlen in Baden-Würtemberg, Stresstest für KKWs, Bundestag beschließt Atomausstieg usw. führt fortwährend zu neuen Situationen. Je nachdem, welche Eindrücke, Beobachtungen und Informationen vorliegen entstehen unterschiedliche persönliche Wahrnehmungen (Abbildung 2). Es entstehen wechselnde Meinungsmehrheiten.

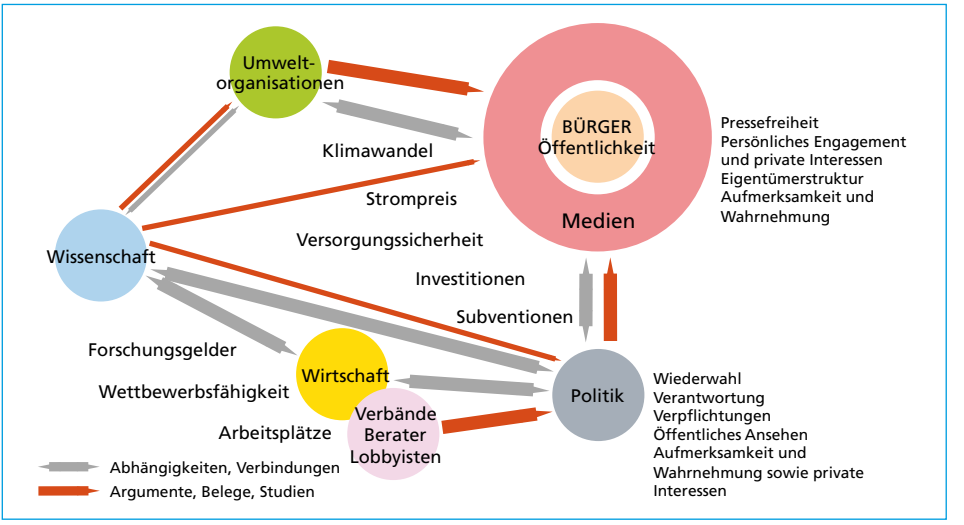


Abb. 2: Stark vereinfachte Darstellung der Beeinflussung und Abhängigkeiten im Meinungsbildungsprozess

Quelle: In Anlehnung an die Darstellung von N. Fiedrichsen, in Energie, Macht, Vernunft auf S. 163, (Hrsg.) J. Creutzig und J. C. Goldschmidt, 2008

Kaum ein Thema wird derzeit in den Medien intensiver diskutiert als die umweltverträgliche und bezahlbare Stromversorgung. Für viele ist dabei die Vorstellung von Umweltverträglichkeit automatisch mit den regenerativen Energiequellen verknüpft. Sonne, Wind, Wasser und Biomasse sind die bevorzugten Alternativen zu den fossilen Energieträgern und der Kernenergie. Sie sind die Hoffnungsträger der zukünftigen Stromversorgung. Umstritten ist, wie diese Zukunftsvorstellung erreicht werden soll.

Experten und Politiker verunsichern die Öffentlichkeit durch eine Vielzahl von Prognosen und Szenarien zum Energiebedarf, zur Entwicklung der Energiepreise, zur Versorgungssicherheit sowie der daraus abgeleiteten Umwelt- und Standortprobleme. So ist eine Diskussion entstanden, an der sich neben Wissenschaft, Wirtschaft und Staat auch Bürgerinitiativen, Umweltgruppen, Medien, Gewerkschaften, Parteien und sogar Kirchen beteiligen. Es wird eine emotionale Debatte zur Energieversorgung geführt, die eine sachliche Auseinandersetzung kaum noch erlaubt.

Technik und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sind zur Entscheidungsfindung nicht mehr ausreichend. Gesellschaftliche Akzeptanz, soziale Gerechtigkeit und Konsens haben sich zu signifikanten Einflussgrößen entwickelt. Diese äußerst diffusen und sensiblen Kategorien müssen in den Entscheidungsprozess zur Technologieauswahl mit einbezogen werden.

1. Grenzen numerischer Modelle zur Technologiebewertung

Wissenschaft zeichnet sich durch ein hohes Maß an Abstraktion aus. Erkenntnisse gewinnt sie zu einem nicht unwesentlichen Teil aus Modellen. Diese Modelle sind Vereinfachungen und Idealisierungen der Wirklichkeit.

Ähnliche Ursachen haben auch ähnliche Wirkungen. Abweichungen und Ungenauigkeiten, aufgrund der theoretischen Vereinfachungen und der verwendeten Nährungsverfahren können bestimmt werden [3]. Bei einem nicht linearen Problem ist diese Schlussfolgerung nicht mehr zulässig. Eindeutigkeit zerfällt in Vieldeutigkeit. Ähnliche Ursachen können zu ganz unterschiedlichen Wirkungen führen. Zur Bearbeitung von nicht linearen Aufgabenstellungen, wie bei der Bewertung von Technologien, wird auf spezifische mathematische Methoden (Abbildung 3, linke Darstellung) zurückgegriffen [4 bis 7]. Ihre Anwendung führt meistens zur Reduktion des Aufwandes bei der Lösungssuche (Abbildung 3, rechte Darstellung). Jedoch ist dafür methodenrelevantes Fachwissen erforderlich. Dies beschränkt den Anwenderkreis und mindert das Vertrauen in die erhaltenen Ergebnisse.

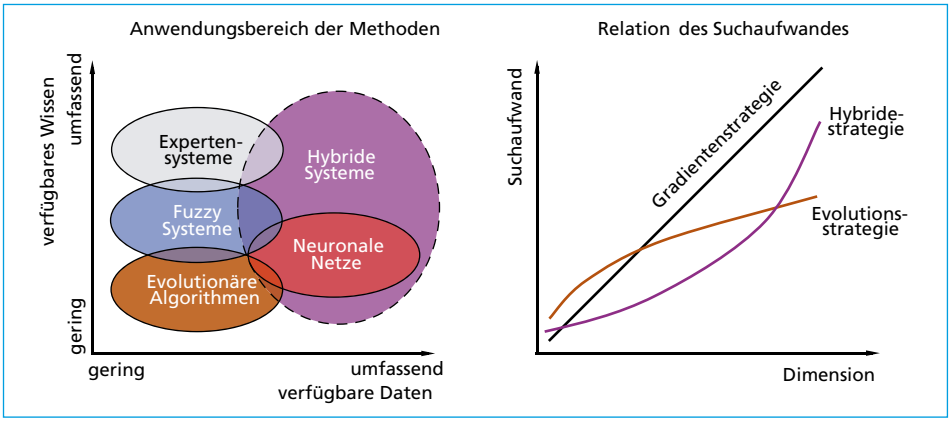


Abb. 3: Qualitative Darstellung zum Anwendungsbereich und Suchaufwand numerischer Modelle

Quelle: Cziesla, F.: Methoden der Computational Intelligence in der Energie- und Verfahrenstechnik. TU Berlin, Vorlesung WS 2004/05

Grundsätzlich durchlaufen Technologien einen *Lebenszyklus*, während dem sich das Verbesserungspotenzial ihrer technischen Leistungsfähigkeit sowie der notwendige Aufwand für ihre Weiterentwicklung verändern (Abbildung 4, linke Darstellung). Am Anfang steht die Einführung der Technologie. Es muss die technische und wirtschaftliche Machbarkeit nachgewiesen werden. Danach folgt die Verbesserung der Eigenschaften. Dies führt zur wachsenden Verbreitung und umfassenden Nutzung (Reife) bis zur Ausschöpfung ihrer Möglichkeiten (Sättigung), um dann einer neuen Technologie (Technologie 2) zu weichen. Der erreichte Stand innerhalb dieser Abfolge gibt Auskunft über das noch vorhandene Potenzial und damit über die Bedeutung der Technologie im betrachteten Zeitabschnitt.

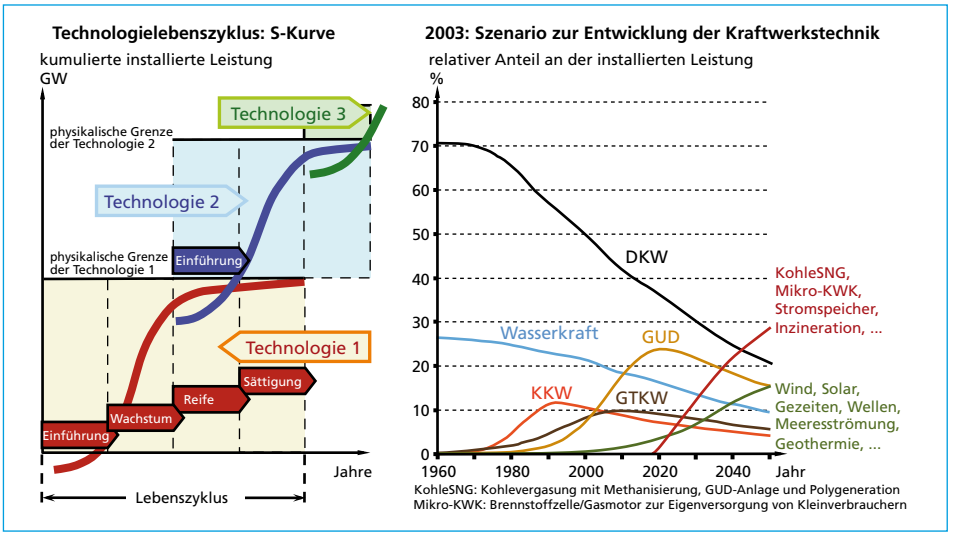


Abbildung 4: Technologielebenszyklus mit Szenario zur Substitution der Technologien

Quellen:

Voigtländer, P.; Gattinger, M; Lenk, U.: Wettbewerb der Technologien zur Stromerzeugung. Dresden, 2001

Lenk, U.; Pehlivan, S.; Voigtländer, P.: Entwicklungsperspektiven von Kraftwerksanlagen. Dresden, 2003

Die dargestellte Abfolge kann durch eine logistische Funktion, eine sogenannte *S-Kurve* beschrieben werden [8]. S-Kurven sind Wachstumsfunktionen, bei denen die Zuwachsraten der bereits erreichten Größe und der noch erreichbaren Größe proportional sind. Das Verbesserungspotenzial nähert sich asymptotisch einer Sättigung. Trotz ihrer relativen Einfachheit haben S-Kurven auch bei sehr komplexen und sich zeitlich verändernden Systemen eine hohe Robustheit und damit Verlässlichkeit bewiesen [9, 10].

Abbildung 4 zeigt in der rechten Darstellung, die mit Hilfe von Wachstumsfunktionen aus den Zuwachsraten der installierten Leistung der Technologien von 1960 bis 2000 errechnete mögliche zukünftige Entwicklung. Die Darstellung wurde in der Vergangenheit in Veröffentlichungen zur Diskussion möglicher zukünftiger Technologieentwicklung genutzt [11, 12]. In der jüngeren Vergangenheit jedoch nicht mehr, da so die erwartete Wiederbelebung der Kernenergie nicht darstellbar ist. Dies zeigt noch einen weiteren wichtigen Aspekt bei der Technologieentscheidung. Faktenwissen konkurriert mit persönlichen, kulturell geprägten Überzeugungen.

Die hohe Komplexität der nicht rückwirkungsfreien Kausalzusammenhänge sowie die unvollständige und unübersichtliche Informationslage bei Markt, Technik, Wettbewerbern,

Kunden, Mitarbeitern, Gewerkschaften, Politik, Medien, Aktionären, Umweltschutz usw. führen zu dem von Stetter [13] nachgewiesenem empirischen Phänomen, dass Unternehmensentscheidungen nicht auf Basis von betriebswirtschaftlichen und strategischen Überlegungen erfolgen. Entscheidungen erfolgen üblicherweise auf einer Vielzahl von oft widersprüchlichen Motiven und Partikularinteressen der Einzelakteure und sind somit im hohen Maße vom Zufall und durch Irrationalität geprägt [14 bis 18]. Denn kein Mensch kennt alle Details, die für eine optimale Entscheidung eines komplexen Problems nötig sind [19, 20]. Auch kann er nicht alles genau berechnen, da die bekannten mathematischen Methoden bei nicht linearen Problemen keine exakten Aussagen liefern, sondern nur Wahrscheinlichkeiten [21]. Zusätzlich entziehen sich die vorgefundenen Randbedingungen weitestgehend einer numerischen Behandlung, sodass ein anderes Verfahren als die herkömmlichen technischen Optimierungsmethoden herangezogen werden muss.

2. Neurodidaktischer Lösungsansatz

Im Gegensatz zu Computern, die alle eingegebenen Informationen verarbeiten, sondert das menschliche Gehirn sehr große Anteile der erhaltenen Information wieder aus. Dies ist ein überlebenswichtiger Vorgang [22].

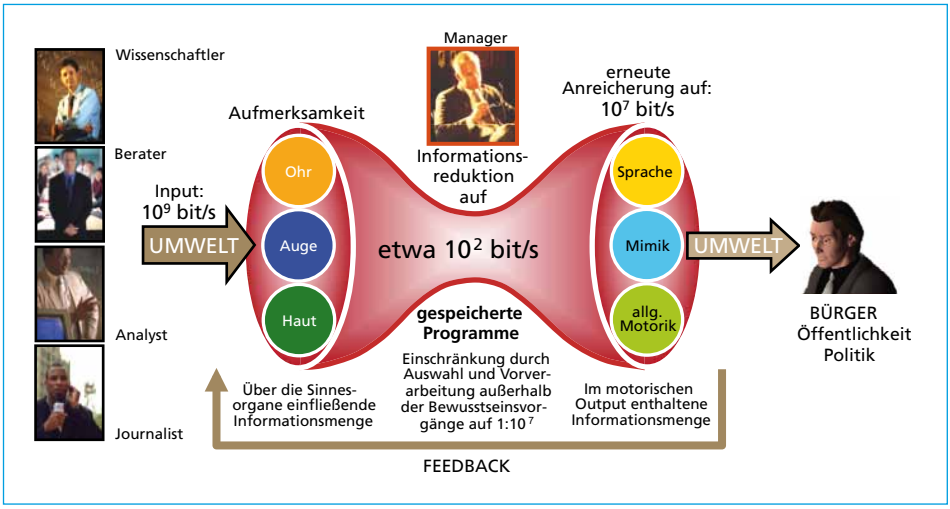


Abb. 5: Flaschenhalsmodell der Wahrnehmung

Quelle: In Anlehnung an die Darstellung von Keidek. In: Vester, F.: Denken, Lernen, Vergessen – Was geht in unserem Kopf vor, wie lernt das Gehirn, und wann lässt es uns im Stich? München, 1978

Eine Entscheidung kommt auch nur deshalb zustande, weil nicht jede erhaltene Information genutzt wird, sondern nur eine Auswahl. Das in Abbildung 5 dargestellte Flaschenhalsmodell zeigt, dass von der aus der Umwelt erhaltenen Informationsmenge nur etwa der zehnmillionste Teil im Gehirn zur Weiterverarbeitung genutzt wird. Diese Auswahl wird mit dem bereits im Gehirn vorhandenen Wissen und Erfahrungen wieder auf das Zehntausendfache angereichert und in neuer Form, sozusagen personalisiert, an die Umwelt zurückgegeben. Interessant ist dabei noch, dass die Auswahl der Information und die Zuweisung ihrer Wertigkeit nicht in der Großhirnrinde erfolgt, sondern im limbischen System. Die menschliche Informationsauswahl und Verarbeitung erfolgt demzufolge sehr

eng verknüpft mit seiner Gefühlwelt. Dies führt in der zwischenmenschlichen Kommunikation zu einer Vielzahl von Perspektiven aufgrund der sehr unterschiedlichen individuellen Erfassung und Interpretation der Realität.

Täglich müssen beruflich oder privat unterschiedlichste Entscheidungen getroffen werden. Dabei hat die Frage, wie man sich entscheidet, immer zweifache Auswirkungen. Zum einen die Auswirkungen der Entscheidung selbst und zum anderen die Auswirkungen der Entscheidung auf andere und deren Entscheidung. Meistens lassen sich diese beiden Aspekte der Frage nicht voneinander trennen, da sie in gegenseitiger Abhängigkeit zueinander stehen. Die eigene Entscheidung ist dabei davon abhängig, wie sich andere entscheiden werden, ohne sich dessen immer bewusst zu sein. Aber auch die Entscheidung der Anderen wird wiederum von der eigenen Entscheidung beeinflusst. Entscheidungen sind deshalb immer subjektiv.

Menschen können biologisch und psychisch nicht allein überleben. Deshalb ist das, was Mitmenschen denken, fühlen und tun, so wichtig für uns. Diese soziale Dimension ist bei der Entscheidungsfindung und bei der Entscheidung selbst ebenfalls zu berücksichtigen. Vernünftiges Handeln verzichtet auf den schnellen Gewinn, den unmittelbaren Vorteil und schließt Kompromisse, ohne das Ziel aus den Augen zu verlieren.

Sind die Auswirkungen der Entscheidungen nicht gravierend, so ist der Aufwand zur Entscheidungsfindung gering. Anders ist es bei Entscheidungen mit großen materiellen und gesellschaftlichen Auswirkungen, die nur langfristig wieder korrigiert werden können.

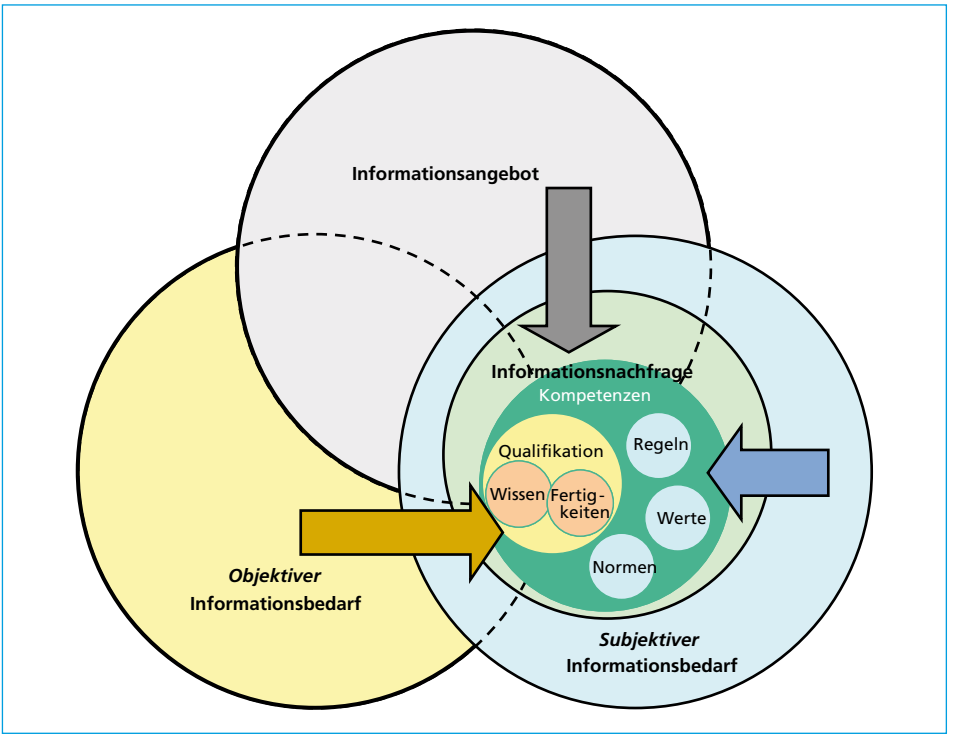


Abb. 6: Entscheidungsproblem

Quelle: In Anlehnung an die Darstellung von J. Erpenbeck und L. v. Rosenstiel: Handbuch Kompetenzmessung. 2007

Dies ist in der Energiewirtschaft und im Kraftwerksanlagenbau der Fall, wenn es um neue Technologien, Anlagen und Fertigungsstätten geht. Bei diesen Entscheidungen geht es um beträchtliche Investitionsvolumen und umfangreiche Arbeitspakete für Ingenieure. Je nachdem, welche Eindrücke, Beobachtungen und Informationen vorliegen, entstehen unterschiedliche persönliche Wahrnehmungen, Entscheidungen und Handlungen. Vorwissen, Intuition und Gefühle beeinflussen das bewusste, rationale Vorgehen und damit die Technologieauswahl in der Energiewirtschaft [23].

Kritisch ist auch, dass alle Menschen über unterschiedliche Informations-, Wissens- und Erfahrungsstände verfügen (Abbildung 6). Aus den verfügbaren Informationen entsteht erst dann Wissen, wenn sie so aufbereitet sind, dass sie als relevant erkannt und verstanden werden. Nur wenn dies erreicht ist, kann jeder kompetent mitdiskutieren und entscheiden. Um dies zu erreichen und die Erwartungen, Wertvorstellungen und Ziele möglichst vieler Personen zu berücksichtigen erfolgte die Sammlung der Parameter zur Technologiebewertung in mehreren, mehrtägigen Workshops. In Abbildung 7 wird die dabei gewählte Vorgehensweise gezeigt.

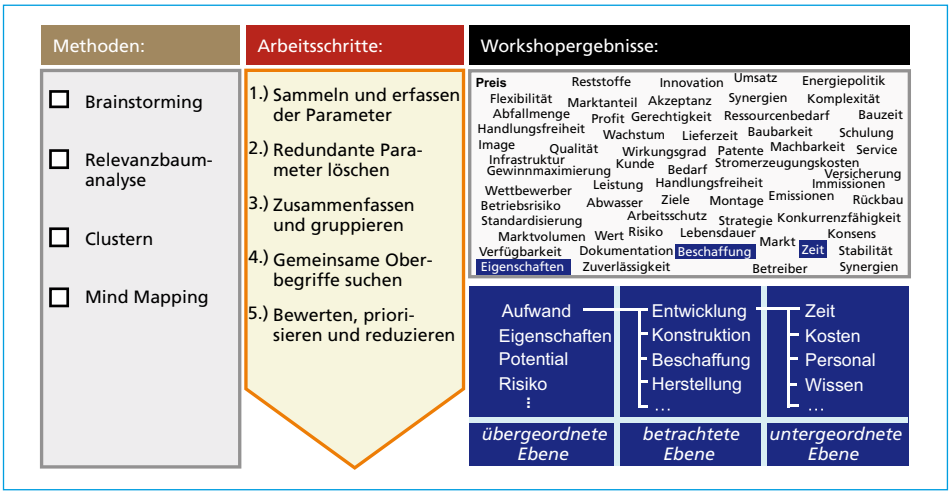


Abb. 7: Aggregation der Entscheidungsparameter

Quellen:

Huthwaite, B., Lenk, U.: Workshop: Key Success Factors. Gatwick, 2001

Kaulbarsch, R.; Lenk, U.: Workshop: Product Development. Groß Dölln, 2004

Mit den verschiedenen Gruppen (Mitarbeiter, Betreiber, Investoren, Unterlieferanten, Berater und Öffentlichkeit) erfolgte zuerst eine bunte Sammlung von Entscheidungsparametern. Danach wurden aus diesen übergeordnete Begriffe zur Beschreibung, Zusammenfassung und Verdichtung ausgewählt. Das Ergebnis waren sechs Cluster mit den Oberbegriffen: Aufwand, Eigenschaften, Potential, Risiko, Wert und Ökologie. Die gewählte Anzahl der Cluster (Anzahl 6) sowie die Summe der Parameter (Anzahl 43) und ihre Anzahl (7 bzw. 8) in den Clustern sind nicht willkürlich oder zufällig. Sie ergeben sich aus den Grenzen der kognitiven Fähigkeiten des Menschen, aus numerischen Einflüssen sowie den Grundeigenschaften komplexer Systeme. Empirische Analysen von Vester [24] zeigen, dass etwa 40 Parameter genügen, um auch komplexe Systeme ausreichend gut zu beschreiben. Unterhalb dieser Anzahl ist das System meist nicht komplett beschrieben und oberhalb kommt es zu Redundanzen.

Schlagwortverzeichnis

A

Absorbentien
für die CO_2-Wäsche 219
Abwärmenutzung 345
Abzehrungsraten 328
Abzehrung von Schweißungen 321
Al_2O_3 611
Alkalibursting 603
Alkalikorrosion 602, 611
alpha ventus 450
Aluminium-Plattenwärmeübertrager 31
Aminwäsche 199, 209
Androsselung 267
des Hochdruckdampfs 492
Anfahrvorgänge 683
Atomausstieg 526
Auftragschweißungen 321
Ausbrandluft 47

B

Batterien 530
Beläge 294
Belagsentwicklung 323
Belags- und Schlackebildungsverhalten 117
Bestandskavernen 525
Betriebsmittelauslastung 482
Biomasse 353, 362
Blindleistungsstellbereich 482
Boiler Simulation Facility (BSF) 103
Braunkohle
als Chemie- und Energierohstoff 595
mechanische Verdichtung 636
Braunkohlebrikettstrang 635
Braunkohlennutzung
Transformation 594
Braunkohlestaubfeuerung 117
Braunkohletrocknung 73
Brennerflammen 702
Brennergeometrie 43, 285
Brennraumüberwachung
akustische und optische 647
Brennstoffe
wasserhaltige 346
Brikettstrangpresse 635
Brüdennutzung 82
Bundesrohölreserve 524

C

CAES 534
Carbonate Looping Verfahren 202
CCS-Technologie 4, 52, 136, 139, 199
CFD-Simulation 709
Chlorkorrosion 671
CO_2-Abscheiderate
Einfluss auf den spezifischen
Energiebedarf 212
CO_2-Absorptionsprozess 210
CO_2-Abtrennung 183, 219
CO_2-Aminwäsche 199, 209
CO_2-Anlage 25, 59
CO_2-Aufbereitung 87
CO_2-Booster 92
CO_2-Einlagerung 139
CO_2-Emissionen
weltweite 200
CO_2-Produkt
verdichtetes, superkritisches 29
CO_2-Reinheit 52, 174
CO_2- Reinigungsanlage 59
CO_2-Rückgewinnungsraten 29
CO_2-Speicherung 139
CO_2-Verdichtung 33, 87
CO_2-Verflüssigung 34, 59, 87, 92
CO_2-Wäsche 217
CO_2-Zertifikate 547
Combined Cycle Power Plants 247
Compressed Air Energy Storage 534
Concentrating Solar Power 423
CO-Strähnen 384
CSP-Kraftwerke 423

D

Dampfturbinen 239, 263
Dampfturbinenregelung 515
Dampfturbosatz 404
demand site management 530
Druckluftspeicher 529, 543, 560
adiabate 579
Druckvergasungsreaktoren
Beschickung 635

E

Echtzeit-Korrosionsmonitoring 669
EEG 437
Elektrizitätseinspeisung
fluktuierende 549
Elektro-Chemische-Speicher 544
Emissionshandel 4
Emissionsspitzen 169
Energien
erneuerbare 4, 463, 523, 540
Energiepolitik 3
Energiereserven 524
Energierohstoffe
Strukturaufklärung 623
Energierückgewinnung 345
Energiespeicher 523, 542, 553
Entladezeit und Leistung 542
Energieversorgung 3
stabile 524
Energieversorgungssysteme
dezentrale 237, 473
Energiewende 3
Entropie 463
Entschwefelung 149, 152, 157
Erdgasspeicherung 525
Erdölbevorratungsorganisationen 524
Erdwärme 463, 468
Ermüdungsschädigung 689
erneuerbare Energien 4, 523, 540
natürliche Grenzen 463
Erosion 395, 704
EWEA
europäischer Windenergieverband 438

F

Falschluft 66
Fernheizwassernetz 230
Fernwärmespeicher 571
Fernwärmeversorgung 339
Feuerraumüberwachung 649
Feuerraumwände
Schutz vor korrosiven Angriffen 286
Feuerungskonzept 42
Feuerungsmodernisierung 289
Feuerungsoptimierung 45, 367
Flammenform 285
Flugstaubablagerungen 704
Frequenzstabilität 515
Fresnel-Kollektoren 425
Frischdampf-Parameter 244

G

Gaskraftwerke 526
Gasmarkt 526
Gasspeicher-Wirtschaft 527
GB Grid Codes 489
Gesamtstöchiometrie 104
Gießmassen 611
Gleitdruck
modifizierter 267
Glykoltrocknung 33
Gravitation 463, 468
Gravitationsantrieb 465
Grid Code 489
Großspeicher 523
Grundlastkraftwerke 265
GuD-Kraftwerke 339, 528

H

HD-Stufenbypass 267
HD-Vorwärmerbypass 270
Heißgasreinigung 149
Heißstarts 692
Heißwasserspeicher 571
Heißwasser-Verdrängungsspeicher 570
Heizflächenwertigkeit 314
Heizkraftwerk Cottbus 291
High pressure oxyfuel process 133
Hochdruckturbine mit Stufenbypass 267
Hochleistungsdampfturbinen
für solarthermische Kraftwerke 403
Höchstspannungsleitungen 5
Hochtemperatur-Chlorkorrosion 670
Hochtemperatur-Online-
Korrosionsmessung 674

I

IGCC-Prozess mit CO_2-Abscheidung 136
IR-Spektrometrie 624

K

Kalkqualität 291
Katalysatorgifte 394
Kavernenanlagen 524
Kernkraftwerke 526
Kesseleffektivität 301
Kesselreinigung 301
Klimaerwärmung 469
Kohlechemie
  CO_2-arme 593
Kohlekraftwerke im Energiemix
  mit den erneuerbaren Energien 699
Kohlelager 700
Kohlemineralien 710
Kohlenstaubverteilung 286
Kohlestaubbrenner
  Anordnung 43
Kondensationswärme 346
Kondensations-Wärmetauscheranlage 348
Korrosion 173
  von Auftragschweißungen 327
Korrosionsrate 669
Korrosionsschäden 669
Korrosionsschutz 279
Korrosionssensor 669
Korrosionsverhalten 117
Korrosionsversuchsstand 176
Kraftstoffe 467
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) 237, 353, 565
Kraftwerk
  lebensdauerverlängernde
    Maßnahmen 229
  solarthermisches 403
Kraftwerksfahrweise 341
Kraftwerkspark
  fossiler 4
Kraftwerkssimulation 501
Kreislaufelemente
  Anreicherung unter
    Oxyfuelbedingungen 117
Kriechermüdungsschädigung 691
Kriechschädigung 688
Kurzschluss
  dreipoliger kraftwerksnaher 515
Kurzzeit-Wärmespeicher 565
KWK 237, 353
KWK-Anlagen 565
  hocheffiziente 567

L

Lagerung von Kohleschüttungen 701
Lastabwurf 515
Laständerungen 490
Lastanforderungen für zukünftige
  Kraftwerksauslegungen 263
Lastflussumkehr 479
Lastmanagement 529
Lastschwankungen
  gasgefeuerte Kombikraftwerke 260
Lausitzer Trockenbraunkohle 108
Lebensdauerverbrauch 508
Leistungsreserve 261
Leistungsspeicher 542
Leitfähigkeitsmessungen 665
Liberalisierung des Gasmarktes 526
Life Time Extension 233
Low Load Operation Capability 248
Low-NO_x-Feuerungen 279
LPR 671

M

Materialabzehrung 675
Materialforschung 669
Materialtestsonde 674
MEA 211, 222
  Degradation 215
MEA-Wäsche
  Regenerationsenergiebedarf 183
Mehrfachstörungen im elektrischen Netz 515
Membranverdichter 91
Messtechnik 669
Methan
  synthetisches 530
Mineralumwandlung
  bei der Kohleverbrennung 709
Minutenreserve 261
Mobilitätssektor 530
Modelica 501
Modernisierung
  eines Braunkohlekraftwerks 37
  eines GuD-Kraftwerkes 339
Molsiebadsorber 60, 87
Mühle 44

N

Netze
Ausbau 4
intelligente 6
Spannung- und Frequenzstabilität 519
Netzkurzschluss
dreipoliger 516
Netzstabilität 473, 476, 519
NH_3-Schlupf 378
Nickelbasislegierungen 688
Niederdruck- und Hochdruck-Vorwärmer 239
Niedertemperatur-Online-Korrosionsmessung 674
NO_x-Abscheidegrad 370
NO_x-Frachten 113
NO_x-Minderung 377, 387
primärseitige 279
NO_x-Reduktionsmittel 384
NO_x-Regelung 365

O

Offshore-Windenergie 5, 434
Wirtschaftlichkeit in Deutschland 449
Online-Korrosionsmonitoring 669
Online-Wasseranalytik 661
On-load-Kesselreinigung 301
Onshore-Windenergie 434, 442
Optimierung der Feuerung 45, 367
Oxidant 111
OXYCOAL-AC 149
Oxyfuel 103, 149
Oxyfuel-Anlagen
Konfigurationen 121
Oxyfuel-Betrieb 155
Oxyfuel-Demonstrationskraftwerk 25
Oxyfuel-Feuerung 103, 155
Oxyfuel-Forschungsanlage 87
in Schwarze Pumpe 25, 51
Oxyfuel-Kraftwerk 87, 115
Oxyfuel-Prozess 87, 103, 117, 133
Oxyfuel-Technologie 51
Entwicklungspotenziale 69
Oxyfuel-Verfahren 173
Oxyfuel-Pilotanlage mit Tangentialfeuerung 101

P

Parabolrinnen-Kollektoren 403, 425
Parabolrinnen-Kraftwerke
solarthermische 411
PCC Pilotanlage in Niederaußem 209
PFBC 291
Photovoltaik 474, 480, 528
Pipelinenetz 525
Plasmazündfeuerung 703
Plattenkatalysatoren 390
Polarisationswiderstand 671
Portfoliomanagement 341
Post Combustion Capture 201, 211, 219
Pressurized Fluidised Bed Combustion 291
Pressverdichtung von Braunkohle 637
Pumpspeicherkraftwerke 528, 543, 560
Pyrolyseprodukte 626

Q

Quecksilberoxidation
von SCR-Katalysatoren 396

R

Rauchgasentschwefelungsanlage 705
Rauchgaskondensator 91
Rauchgaskonditionierung 345
Rauchgasreinigung
Auswirkungen von Schwachlastfahrweisen 704
Rauchgasrezirkulation 106
Rauchgastrocknung 92
RAVE (Research at alpha ventus) 450
Reduktionsmittel 378
Regelfähigkeit 490
Regelstufenmaschine 266
Regelung
beobachtergestützte 510
Regenerationsenergiebedarf
der MEA-Wäsche 192
Repowering 434
Rußbläser 313

S

Salz-Asche-Belag 322
Salzkavernen 523, 589
Sauerstoffmangel
  an den Feuerraumwänden 285
Säure-Leitfähigkeit 665
Säuretaupunkt 345, 677
Säuretaupunktsunterschreitungen 348
Schädigung
  thermomechanische 683
Schädigungsmechanismen
    bei Heiß- und Warmstart 688
Schluckfähigkeit 266
Schnellstart 261
Schwachlastbetrieb
  Auswirkungen auf das
    Kohlekraftwerk 699
Schwarzfall 515
Schwefel
  Einbindung in die Asche 155
  Freisetzungsverhalten aus festen
    Brennstoffen 631
Schwefeldioxid
  Bildung und Abscheidung 156
Schwefeloxide
  Emissions- und Abscheideverhalten 155
Schwefeltrioxid 155
  Bildung und Abscheidung 159
Schweißplattierungen 321
SCR-Katalysatoren 387
Seitenwandluftsystem 286
Selbstentzündung 701
Sichter 43
Smart Grids 6, 483
Smart Metering 6
SNCR-Verfahren 377
  Entwicklungspotential 384
  Temperaturabhängigkeit 370
Solarantrieb 464
Solardampfturbinentechnik 404
Solarfeld 411, 427
Solarkraftwerke 425
Solarstrahlung 463, 468
Solarthermie 423
Solar Topping
  von Dampfkraftwerken 423
Solarturmprozess 408
Sorbent 292
Spannungsanhebung 480
Spannungshaltungsproblem
    bei dezentraler Einspeisung 481
Speicherbeladung 556
Speicherentladung 556
Speicher im Kraftwerk 492
Speicherkapazität 485, 557
Speicherkaverne 529
Speicherkraftwerke 529, 539
  Wirtschaftlichkeit 547
Speichertechnologien 560
Speicherwirkungsgrad 557
Speisewasserendtemperatur 272
Speisewasservorwärmung 239
Spitzenvorwärmer 273
Stadtwerke Cottbus 291
Stirling-Motor 356
Strangpresse 637
  als Eintragssystem für
    druckaufgeladene Reaktoren 642
Stromerzeugung
  aus erneuerbaren Energien 540
Stromgestehungskosten
  der Windenergie 458
Stromnetze 438, 488
Stromnetzplanung 475
Strompreis
  Einflüsse 545
Strompreisdifferenzen
  tägliche 548
Strompreise
  Charakteristika 549
Stromspeicher 477
Stromverbundnetze 528
Stufenmischbrenner 280
Stufenventil 267

T

Tangentialfeuerungssystem 106
Taupunktkorrosion 677
Technologieauswahl
  in der Kraftwerkstechnik 9
Technologiebewertung 11
Teil-/Schwachlast 699
Thermodynamik 470
Thermopotentialspeicher 553
  Investitionskosten 561
Thermoschockbelastung 611
Trockenbraunkohlekraftwerk 73

U

Überdrehzahl 515
Überhitzer 45
Überhitzerschaltung 41
Überlastventil 267
UCTE-Verbundnetz 476
Ultra-Low-NO_x-Brenner 284
Umspannwerke mit hohem
Rückspeisungsanteil 483

V

Vakuumkondensationsturbine 241
Ventilatormühlen 43
Verbrennung
gestufte 279
Verbrennungsregelung 647
Verbrennungs- und Vergasungsanlagen 611
Verdampfung
elektrothermische 603
Vergasung 354
druckaufgeladene 635
Vergasungsverfahren
innovative 601
Verschlackung 709
Verschmutzung 709
Verschmutzungsneigung
von Kesselheizflächen und
des Rauchgastraktes 291
Versorgungssicherheit 523
Verteilnetz 478

W

Wabenkatalysatoren 390
Wandabzehrungen
infolge reduzierender Atmosphäre 279
Wärme
latente 346
Wärmeaufnahme 113
Wärmerückgewinnung
aus Rauchgasen 345
Wärmespeicher 557, 572, 586
Wärmestromdichte 321
Warmstarts 692
Waschmittel 211, 219
thermische Stabilität 215
Zwischenkühlung 214
Waschmittelumlaufrate 213
Waschmittelverluste 214
Wasser-Dampf-Kreislauf
Auswirkungen von
Schwachlastfahrweisen 703
Ertüchtigung von Probenahme und
Instrumentierung 661
Wasserstoff
regenerativ erzeugter 595
Wasserstoffspeicherkraftwerke 532
Wasserstoffverteilungs-Infrastruktur 530
Werkstoffe 611
Werkstoffentwicklung 601
Wiederverstromung 530
Windenergie 5, 528
Windenergieanlagen
Abschattungsverluste 442
Windenergieertrag 457
Windindustrie
Exportmärkte 435
Windklau 446
Windleistung
fluktuierende 541
Windparks 529
Verdichtung 441
Windüberschussmengen 529
Wirbelschichtbraunkohle 291
Wirbelschichtfeuerung
druckaufgeladene 291
Wirbelschicht-Trocknung
mit interner Abwärmenutzung 73
Wirkungsgradsteigerung in Teillast 271
WTA-Technik 73

Z

Zerfall
radioaktiver 464
Zwischenüberhitzung 243