Energietechnologien der Zukunft

Martin Wietschel · Sandra Ullrich ·
Peter Markewitz · Friedrich Schulte ·
Fabio Genoese
Herausgeber

Energietechnologien der Zukunft

Erzeugung, Speicherung, Effizienz
und Netze

Springer Vieweg

Herausgeber

Martin Wietschel
Fraunhofer-Institut für System- und
Innovationsforschung ISI
Karlsruhe, Deutschland

Sandra Ullrich
Fraunhofer-Institut für System- und
Innovationsforschung ISI
Karlsruhe, Deutschland

Peter Markewitz
Forschungszentrum Jülich GmbH
Jülich, Deutschland

Friedrich Schulte
RWE AG
Essen, Deutschland

Fabio Genoese
Centre for European Policy Studies (CEPS)
Brüssel, Belgien

ISBN 978-3-658-07128-8
DOI 10.1007/978-3-658-07129-5

ISBN 978-3-658-07129-5 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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 dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Energie ist ein wesentlicher strategischer Faktor für Wirtschaft und Gesellschaft. Die Herausforderungen des Klimaschutzes, die Verknappung der fossilen Energieträger und die Abkehr von der Kernenergie haben zu einem Transformationsprozess in der Energiewirtschaft geführt. Innovative Energietechnologien in Kombination mit dezentralen Strukturen von Erzeugung und Verteilung gewinnen im zukünftigen Energiesystem immer stärker an Relevanz. Der Marktanteil der dargebotsabhängigen erneuerbaren Energieträger nimmt stetig zu.

In diesem Buch wird zuerst das zukünftige Elektrizitätssystem in einem systemischen Ansatz auf Basis der erwarteten politischen, gesellschaftlichen und technologischen Entwicklungen skizziert. Darüber hinaus werden wichtige innovative Energietechnologien in einem künftigen deutschen und europäischen Elektrizitätssystem identifiziert. Daran anschließend werden für diese Technologien der heutige technische und ökonomische Entwicklungsstand sowie das Entwicklungspotenzial in den nächsten 10 bis 15 Jahren von verschiedenen Experten aus renommierten Forschungseinrichtungen dargelegt. Der künftige F&E-Bedarf mit den wesentlichen Trends wird skizziert. Die Technologiefelder werden abschließend in Roadmaps übersichtlich anhand ihrer technischen und wirtschaftlichen Entwicklungsziele, ihres zeitlich verorteten F&E-Bedarfes, ihrer Marktrelevanz sowie ihrer wichtigsten Treiber und Hemmnisse dargestellt. Aufgrund der aktuell sehr vielfältigen und schnellen Entwicklungen bei den Energietechnologien kann kein Anspruch auf absolute Vollständigkeit in den Darstellungen und Erläuterungen erhoben werden.

Dieses Buch soll zur Grundlageninformation für Wirtschaft, Politik und Wissenschaft dienen und helfen, die entscheidenden Diskussionen und Maßnahmen über langfristige Handlungs- und Entscheidungsspielräume voran zu treiben.

Wesentliche Inhalte des Buches entstanden im Rahmen eines Forschungsprojektes im Jahr 2013 für die Forschungs- und Entwicklungsabteilung der RWE AG, die einer Veröffentlichung dankenswerter Weise zugestimmt hat. Die Verantwortung für die Inhalte liegt aber alleine bei den Autoren der Kapitel. Ein Vorläuferprojekt mit dem Titel *Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung* wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert und hat Eingang in das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung gefunden.

Die Herausgeber

Über die Autoren

M .Sc. Wi.-Ing. Ali Aydemir

Studium des Wirtschaftsingenieurwesens mit Schwerpunkt „Energie- und Verfahrenstechnik“ an der Universität Duisburg-Essen (Abschluss M. Sc. Wi.-Ing 2010). Von 2011 bis 2013 tätig für die Siemens AG als Vertriebsingenieur für den Verdichter-Service in Duisburg. Seit Februar 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung im Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme.

Internet: www.isi.fraunhofer.de

Kapitel 17: Raumluftechnik und Klimakältesysteme

Kapitel 18: Wärmepumpen

Dipl.-Wirtsch.ing. (FH) Tobias Bischkowski

Tobias Bischkowski, Hauptreferent im Bereich Steuerung der Konzern Forschung & Entwicklung (F&E) der RWE AG, ist seit 2005 im RWE Konzern tätig. Er war bis zuletzt mitverantwortlich für die prozessuale Steuerung und Weiterentwicklung des F&E-Projektportfolios. Zuvor war er bei RWE mit der Analyse und Bewertung von Energietechnologien und -szenarien betraut. 2012 erarbeitete er das Konzept der Technologie-Roadmaps als Planungsinstrument der F&E bei RWE.

Bevor Herr Bischkowski im Jahr 2005 in der Internen Revision bei RWE anfang, war er zu Beginn seiner beruflichen Laufbahn vier Jahre als Unternehmensberater in den Bereichen Risk Advisory Services und Business Process Risk Consulting bei den Ernst & Young und Arthur Andersen tätig.

Aktuell ist er bei RWE projektbezogen im Umfeld von Lean Management und Veränderungsprozessen tätig. Tobias Bischkowski ist Diplom-Wirtschaftsingenieur (FH) mit den Studienschwerpunkten im Controlling und Marketing.

Internet: www.rwe.com

Kapitel 1: Motivation, Zielsetzung und Technologieauswahl

Dipl.-Ing. Karl Ulf Birnbaum

Studium Maschinenbau und Brennstoffingenieurwesen an der RWTH Aachen. Von 1979 bis 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrums Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und technologische Entwicklung (IEK-STE).

Schwerpunkte: Konventionelle Kraftwerkstechnik, Mikro-KWK (Haushalte, Kleinverbraucher), Wasserstofferzeugung und -nutzung, Energieversorgungsszenarien.

Internet: www.fz-juelich.de

Kapitel 2: Zukünftige Energiewelt – Szenarien und robuste Trends

Kapitel 16: Mikro-Kraftwärmekopplungsanlagen (Mikro-KWK)

Dr. rer. nat. Klaus Hendrik Biß

Abschluss des Physikstudiums an der Justus-Liebig Universität Gießen. Von 2010 bis 2012 Doktorand am Lehrstuhl Nukleare Entsorgung und Techniktransfer (NET). Promotion im Jahr 2014 an der RWTH Aachen. Seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrums Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und technologische Entwicklung (IEK-STE).

Schwerpunkte: Energiesystemmodellierung, Endenergiebedarfsanalyse, Energieszenarien.

Internet: www.fz-juelich.de

Kapitel 2: Zukünftige Energiewelt – Szenarien und robuste Trends

Kapitel 3: Kohlekraftwerke

Kapitel 4: Gaskraftwerke

Kapitel 5: CO₂-Abscheidung

Kapitel 6: CO₂-Nutzung

Dipl.-Ing. Richard Bongartz

Studium der Kernverfahrenstechnik an der Fachhochschule Aachen. Von 1975 bis 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrums Jülich, seit 2008 am Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und technologische Entwicklung (IEK-STE).

Schwerpunkte: Anlagen der Verfahrenstechnik; technische Bewertung von Energietechnologien, Risikobewertung.

Internet: www.fz-juelich.de

Kapitel 3: Kohlekraftwerke

Kapitel 4: Gaskraftwerke

Kapitel 5: CO₂-Abscheidung

Kapitel 6: CO₂-Nutzung

Kapitel 16: Mikro-Kraftwärmekopplungsanlagen (Mikro-KWK)

Dr.-Ing. Reiner Buck

Studium des Maschinenbaus mit Schwerpunkt Energietechnik an der Universität Stuttgart. Promotion im Jahr 2000 zum Thema „Massenstrom-Instabilitäten bei volumetrischen Receiver-Reaktoren“. Seit 1986 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) tätig, zunächst am Institut für Technische Thermodynamik, seit 2011 am Institut für Solarforschung.

Seit 2011 Leiter der Abteilung „Punkt fokussierende Systeme“ am DLR-Institut für Solarforschung. Schwerpunkte: Entwicklung von konzentrierenden Solarsystemen zur Stromerzeugung, Thermodynamik, System-Auslegung und -Modellierung, optische Konzentratoren. Mitarbeit und Leitung diverser nationaler und internationaler Projekte im Bereich konzentrierender Solarsysteme zur Stromerzeugung.

Internet: www.dlr.de

Kapitel 9: Solarthermische Kraftwerke

Prof. Dr.-Ing. Martin Braun

Studium der „Elektro- und Informationstechnik“ und „technisch orientierte Betriebswirtschaftslehre“ an der Universität Stuttgart. In den Jahren 2005–2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) in Kassel in der Gruppe „Elektrische Netze“. 2008 Promotion an der Universität Kassel über das Thema „Bereitstellung von Netzdienstleistungen durch dezentrale Erzeuger“. Ab 2009 Aufbau der Forschungsgruppe „Dezentrale Netzdienstleistungen“ am Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) in Kassel. 2010–2012 Juniorprofessor für „Smart Power Grids“ an der Universität Stuttgart. Seit 2012 Professor an der Universität Kassel, Fachgebietsleiter „Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze“ verbunden mit dem Kompetenzzentrum für Dezentrale Elektrische Energieversorgungstechnik (KDEE). Seit 2012 Abteilungsleiter „Betrieb Verteilungsnetze“ am Fraunhofer IWES. Forschungsschwerpunkte sind technisch-wirtschaftlich optimierte Verfahren für die Analyse, Auslegung, Regelung und Betriebsführung von Verteilungsnetzen sowie die Bereitstellung von Energie- und Netzdienstleistungen durch dezentrale Anlagen und Verfahren für Energie- und Netzmanagement in dezentralen Versorgungsstrukturen.

Internet: www.uni-kassel.de, www.iwes.fraunhofer.de

Kapitel 15: Elektrische Verteilungsnetze im Wandel

Dipl.-Ing. Johannes Fleer

Studium Umwelttechnik und Ressourcenmanagement an der Ruhr-Universität Bochum. Anschließend Tätigkeit als Planungssingenieur für Photovoltaiksysteme bei der Firma ecoKinetics Pty Ltd in Stapylton, Australien. Seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und technologische Entwicklung (IEK-STE).

Schwerpunkte: Techno-ökonomische Analyse und Bewertung von Energiespeichern, Analyse des Einsatzes netzgekoppelter Batteriespeichersysteme zur Bereitstellung von Regelleistung.

Internet: www.fz-juelich.de

Kapitel 10: Elektrochemische Speicher

Dr. Tobias Fleiter

Tobias Fleiter studierte Wirtschaftsingenieurwesen „Energie- und Umweltmanagement“ an der Universität Flensburg mit Studienaufenthalt in Schweden. Seit 2007 ist Tobias Fleiter am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung im Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme tätig. Währenddessen hat er einen Aufenthalt bei der Europäischen Kommission in der Generaldirektion für Energie- und Transport absolviert und war als Gastwissenschaftler an der Universität Bordeaux IV sowie am IPM der Chinese Academy of Science in Peking. Seine Doktorarbeit hat er an der Universität Utrecht zum Thema „Die Adoption von Energieeffizienztechnologien durch Unternehmen“ im Jahr 2012 abgeschlossen. Seit 2013 ist Tobias Fleiter Leiter des Geschäftsfeldes Energienachfrageanalysen und -projektionen. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Modellierung der Energienachfrage sowie Energieeffizienz in der Industrie. Dies beinhaltet sowohl techno-ökonomische Bewertungen von Energieeinsparpotenzialen als auch Wirkungsanalysen von Instrumenten zur Steigerung der Energieeffizienz.

Internet: www.isi.fraunhofer.de

Kapitel 19: Stromeffizienz in den Sektoren Industrie, GHD und Haushalte

Dr. Nele Friedrichsen

Studium Wirtschaftsingenieurwesen mit Schwerpunkt Energie- und Umweltmanagement an der Universität Flensburg. Promotion in VWL an der Jacobs University Bremen. Von 2010 bis 2012 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Bremer Energie Institut. Seit 2013 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung. Bis Juni 2014 im Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme, danach im Competence Center Energiepolitik und Energiemärkte. Ihre Interessenschwerpunkte sind institutionelle Rahmenbedingungen und Governance insbesondere hinsichtlich der Transition zu einem nachhaltigen Energiesystem. Am Fraunhofer ISI beschäftigt sie sich derzeit mit der Ausgestaltung und Bewertung des EU-Emissionsrechtehandels, dem Netzentgeltsystem im Kontext der Energiewende und den damit verbundenen Herausforderungen sowie der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen energieintensiven Industrie.

Internet: www.isi.fraunhofer.de

Kapitel 20: Verbrauchssteuerung

Dr. Fabio Genoese

Dr. Fabio Genoese ist CEPS Fellow am Centre for European Policy Studies in Brüssel und Dozent am Institut d'études politiques (Sciences Po) in Paris. Seine Forschungs-

schwerpunkte sind der EU-Binnenmarkt für Strom und Gas, eine EU-weite Betrachtung der Energiewende sowie die Bedeutung neuer Energietechnologien zum Voranbringen der Energiewende. Von 2008 bis 2013 arbeitete er am Fraunhofer ISI in Karlsruhe, wo er für Forschungs- und Beratungsprojekte für öffentliche Einrichtungen und Unternehmen in der Energiebranche leitete. Im Jahr 2012 war er als Gastwissenschaftler bei Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM) in Mailand. Er ist promovierter Wirtschaftswissenschaftler.

Internet: www.ceps.eu

Kapitel 11: Druckluftspeicher

Kapitel 12: Power-to-Gas

Kapitel 13: Wasserstoffspeicherkraftwerke

Dr.-Ing. Niklas Hartmann

Dr.-Ing. Niklas Hartmann studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit der Fachrichtung Maschinenbau an der TU Kaiserslautern. Von 2008 bis Ende 2012 promovierte Herr Hartmann zum Thema „Rolle und Bedeutung der Stromspeicher bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien in Deutschland –Speichersimulation und Betriebsoptimierung“ am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart. Seit Januar 2013 ist Herr Hartmann wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und seit Januar 2015 Teamleiter des Teams „Energiesysteme und -märkte“. Der Schwerpunkt seiner wissenschaftlichen Arbeit liegt in der Systemanalyse von Energiesystemen mit dem Fokus der Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien in das Energiesystem Deutschlands.

Internet: www.ise.fraunhofer.de

Kapitel 7: Stromerzeugung aus Windenergie

Kapitel 8: Photovoltaik

Dipl.-Ing. Wilfried Hennings

Studium der Elektrotechnik an der RWTH Aachen. Seit 1979 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrums Jülich, seit 2008 am Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE).

Schwerpunkte: Integration von erneuerbaren Energien, Speichern und Elektrofahrzeugen im Stromversorgungssystem.

Internet: www.fz-juelich.de

Kapitel 21: Elektromobilität

M .Sc. Noha Saad Hussein

Noha Saad Hussein hat einen Bachelor in Architekturingenieurwesen und Umwelttechnik und einen Masterabschluss in erneuerbaren Energien und Energieeffizienz an der Universität Kassel. Sie hat ihre Masterarbeit am Fraunhofer ISE zu dem Thema lokales Wertschöpfungspotenzial von CSP und Windkraftanlagen in Ägypten geschrieben. Seitdem arbeitet sie am Fraunhofer ISE als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Team „Energiesysteme und -märkte“. Ihr Hauptfokus liegt in der Energiesystemanalyse von Verteilnetzen

mit Schwerpunkt auf dem Wärmesektor und den Strom-Wärme Kopplungstechnologien. Zusätzlich arbeitet sie daran, erneuerbare Energietechnologien techno-ökonomisch zu bewerten und das lokale Wertschöpfungspotenzial zu identifizieren. Weiterhin untersucht sie alternative Lösungen erneuerbarer Versorgung der unterschiedlichen Verbrauchssektoren.

Internet: www.ise.fraunhofer.de

Kapitel 7: Stromerzeugung aus Windenergie

Kapitel 8: Photovoltaik

M. Eng. Verena Jülch

Studium Energie- und Umweltmanagement an der Universität Flensburg. Seit 2011 ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg, zunächst im Bereich solar betriebene Meerwasserentsalzungsanlagen, dann im Team „Energiesysteme und -märkte“ tätig.

Schwerpunkte: Techno-ökonomische Analyse von Photovoltaik, anderen erneuerbaren Energien und Stromspeichertechnologien in Deutschland und weltweit.

Internet: www.ise.fraunhofer.de

Kapitel 7: Stromerzeugung aus Windenergie

Kapitel 8: Photovoltaik

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Erika Kämpf

Studium der elektrischen Energietechnik an der Technischen Hochschule Karlsruhe (heute: KIT), wirtschaftswissenschaftliches Zusatzstudium an der RWTH Aachen. Von 2005 bis 2010 Projektingenieurin bei Siemens Energy Automation: Mitwirkung an Entwicklungsprojekten für Verteilnetz-Analyse-Anwendungen (Distribution Management Systems) und dem Smart Grid Projekt E-DeMa, Fabriktests und weltweite Vor-Ort-Inbetriebnahme von Energie-Management-Systemen für Übertragungsnetzbetreiber. Seit 2011 wissenschaftliche Mitarbeit und Projektleitung am Fraunhofer IWES sowie Promotion im Bereich „Blindleistungsbereitstellung von Verteilnetzen an Übertragungsnetze“.

Internet: www.uni-kassel.de, www.iwes.fraunhofer.de

Kapitel 15: Elektrische Verteilungsnetze im Wandel

Dipl.-Ing. Philipp Klever

Studium der Umwelttechnik und Ressourcenmanagement an der Ruhr-Universität Bochum. Von 2012 bis 2014 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrums Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und technologische Entwicklung (IEK-STE). Seit April 2015 geschäftsführender Gesellschafter der Firma eneri-on GmbH & Co. KG im Bereich Energie- und Ressourceneffizienz für Unternehmen.

Schwerpunkte: wirtschaftliche und technische Bewertung effizienter Energieerzeugungsanlagen im Gebäudesektor.

Internet: www.fz-juelich.de

Kapitel 16: Mikro-Kraftwärmekopplungsanlagen (Mikro-KWK)

M. Sc. Markus Kraicz

Markus Kraicz studierte Elektro- und Informationstechnik an der Hochschule Anhalt, elektrische Energietechnik an der Universität von Süddänemark und regenerative Energien und Energieeffizienz an der Universität Kassel. Er ist seit September 2012 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) in Kassel in der Abteilung „Betrieb Verteilungsnetze“ tätig.

Forschungsschwerpunkte: Parallelbetrieb lokal geregelter Netzbetriebsmittel und dezentraler Erzeugungsanlagen, Maßnahmen der statischen Spannungshaltung und des Blindleistungsmanagements in Netzplanung und Netzbetrieb.

Internet: www.iwes.fraunhofer.de

Kapitel 15: Elektrische Verteilungsnetze im Wandel

Dipl.-Ing. Jochen Linssen

Studium des Maschinenbaus an der RWTH Aachen, Fachrichtung Kraftfahrwesen. Seit 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrums Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und technologische Entwicklung (IEK-STE)

Schwerpunkte: Kraftstoffstrategien und Energiespeicher.

Internet: www.fz-juelich.de

Kapitel 10: Elektrochemische Speicher

Kapitel 21: Elektromobilität

Dr. Peter Markewitz

Der Energie- und Verfahrenstechniker Dr. Peter Markewitz ist Wissenschaftler am Forschungszentrum Jülich. Er leitet die Arbeitsgruppe Energietechnik im Bereich Systemforschung und Technologische Entwicklung des Instituts für Energie- und Klimaforschung. Seine Forschungsfelder sind Energiesystemanalysen, Klimagasreduktionsstrategien, Technologiebewertungen sowie Kraftwerkstechnik.

Internet: www.fz-juelich.de

Kapitel 1: Motivation, Zielsetzung und Technologieauswahl

Kapitel 2: Zukünftige Energiewelt – Szenarien und robuste Trends

Kapitel 3: Kohlekraftwerke

Kapitel 4: Gaskraftwerke

Kapitel 5: CO₂-Abscheidung

Kapitel 6: CO₂-Nutzung

Dipl.-Kffr. Julia Michaelis

Studium „Europäische Wirtschaft“ an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg und der École de Management Strasbourg, Frankreich mit Schwerpunkt in Statistik. 2011 Studienabschluss mit Diplomarbeit bei der PricewaterhouseCoopers AG. Von Juni bis Dezember 2011 als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Competence Center Energiepolitik und Energiesysteme am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI, seit

Januar 2012 im Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme. Seit September 2012 Doktorandin am Lehrstuhl für Energiewirtschaft der Technischen Universität Dresden. Forschungstätigkeit im Bereich Energiesystemanalyse und Wirtschaftlichkeitsbewertung von Energiespeichern sowie Produktionsverfahren von Wasserstoff.

Internet: www.isi.fraunhofer.de

Kapitel 12: Power-to-Gas

Dr. Thomas Schlegl

Studium der Physik an der Universität Regensburg und der Université Montpellier II. Promotion zum Dr. rer. nat. an der Universität Regensburg in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Seit 2005 Leitung der Strategieplanung des Fraunhofer ISE und Geschäftsführer der Fraunhofer-Allianz Energie. In 2009 Gründung der Fraunhofer Forschungsgruppe „Energiesystemanalyse“. Schwerpunkt sind Techno-ökonomische Bewertung von Energietechnologien, Marktanalysen und Geschäftsmodelle, Kraftwerkseinsatzplanung und Betriebsstrategien sowie nationale und regionale Energieversorgungskonzepte.

Internet: www.ise.fraunhofer.de

Kapitel 7: Stromerzeugung aus Windenergie

Kapitel 8: Photovoltaik

Dr.-Ing. Peter Stenzel

Studium Umwelttechnik und Ressourcenmanagement an der Ruhr-Universität Bochum. Anschließend wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES) an der Fachhochschule Düsseldorf. Promotion zum Dr.-Ing. an der Ruhr-Universität Bochum am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE) im Jahr 2011. Seit Ende 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung – Systemforschung und technologische Entwicklung (IEK-STE).

Schwerpunkte: Techno-ökonomischen Analyse und Bewertung von Energiespeichern, Stromerzeugung mit Osmoseverfahren.

Internet: www.fz-juelich.de

Kapitel 10: Elektrochemische Speicher

Dipl.-Ing. Friedrich Schulte (RWE AG, Konzern F&E, Leiter Technologien/Strategie)

Friedrich Schulte ist im RWE Konzern verantwortlich für die Strategie in Forschung & Entwicklung sowie „Technology Foresight“. Im Mittelpunkt seiner Arbeit steht die kontinuierliche Bewertung aller technologischen Entwicklungen mit Relevanz für die Energiewirtschaft sowie die Ableitung und Umsetzung der daraus folgenden F&E-Bedarfe.

Friedrich Schulte arbeitet seit 1992 in der Energiewirtschaft und hat dabei in unterschiedlichen Management- und Projektrollen Expertise zu zahlreichen Technologien u. a. aus IT, Kommunikationstechnik, Stromnetzen, Stromerzeugung und Energieanwendung

gewonnen. Seit 2003 liegt sein Arbeitsschwerpunkt auf Innovationen und F&E wobei er auch als Geschäftsführer einer Venture Capital Gesellschaft für Energietechnologien tätig war. Seine aktuelle Funktion umfasst auch Kooperationen von Partnern aus Industrie und Wissenschaft auf internationaler Ebene der Energieforschung.

Herr Schulte hat seinen Abschluss als Dipl.-Ing. Elektrotechnik 1986 an der TU Dortmund erworben und war dort zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Nachrichtentechnik tätig. Ab 1988 entwickelte er im Industrieauftrag elektronische Systeme am Fraunhofer Institut in Duisburg.

Internet: www.rwe.com

Kapitel 1: Motivation, Zielsetzung und Technologieauswahl

Dipl. Wi.-Ing. Jan Steinbach

Jan Steinbach arbeitet seit 2009 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ISI in der Abteilung Energiepolitik und Energiemärkte. Er hat Wirtschaftsingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und an der Universiteit Maastricht mit den Schwerpunkten Energie- und Umwelttechnik, Internationale Wirtschaftspolitik und Finanz- und Rechnungswesen studiert.

Forschungsschwerpunkte sind die modelgestützte Bewertung von Politikinstrumenten zur Förderung von erneuerbaren Energien und Energieeffizienz in Gebäuden. Dazu promoviert er am Institut für Industriebetriebslehre und industrielle Produktion (KIT). Von September bis Dezember 2012 war er Gastwissenschaftler am Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien (USA).

Internet: www.isi.fraunhofer.de

Kapitel 17: Raumluftechnik und Klimakältesysteme

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Michael Taumann

Michael Taumann studierte den Studiengang Sustainable Energy Competence (SENCE) an der Hochschule Rottenburg. Von April 2012 bis Dezember 2012 verfasste Herr Taumann seine Masterarbeit zum Thema „Modellierung des Zubaus erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien in Deutschland“ am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Bis April 2013 war Herr Taumann weiterhin als geprüfte wissenschaftliche Hilfskraft am Fraunhofer ISE tätig. Seit Mai 2013 ist Herr Taumann wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. Der Schwerpunkt seiner derzeitigen Arbeit liegt in der Analyse von Biomasse-KWK in Baden-Württemberg und der Erfahrungsberichte gemäß § 65 EEG.

Internet: www.zsw-bw.de

Kapitel 7: Stromerzeugung aus Windenergie

Dr. phil. nat. Sandra Ullrich

Studium der Biochemie in Leipzig und Frankfurt mit Vertiefung im Bereich Biophysikalische Chemie zur Diplomarbeit im Jahr 2008. Abschluss der Promotion in Biochemie über Funktion und Struktur von Membranproteinen mittels Festkörper-Nuklearmagnetischer

Resonanz-Spektroskopie (NMR) im Jahr 2012. Anschließend wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Goethe Universität und des Biomolekularen Magnetresonanz Zentrums (BMRZ) in Frankfurt. Seit April 2014 wissenschaftliche Mitarbeiterin und Projektleiterin am Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationforschung ISI in Karlsruhe. Ihre Forschungsschwerpunkte sind Elektromobilität, Analyse und Modellierung von Energiesystemen sowie soziale Implikationen und Verteilungseffekte der Energiewende im nationalen und europäischen Kontext.

Internet: www.isi.fraunhofer.de

Kapitel 1: Motivation, Zielsetzung und Technologieauswahl

Kapitel 14: Übertragungsnetze

Prof. Dr. Martin Wietschel

Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Universität Karlsruhe. Promotion und Habilitation mit dem Abschluss der *venia legendi* für Betriebswirtschaftslehre an derselben Universität am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion. Von 2002 bis 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI im Competence Center Energiepolitik und Energiesysteme und seit 2007 Leiter des Geschäftsfelds Energiewirtschaft. Seit Januar 2012 stellvertretender Leiter des Competence Centers Energietechnologien und Energiesysteme sowie Leiter des Geschäftsfelds Energiewirtschaft. Von 2005 bis 2011 hatte er einen Lehrauftrag an der ETH Zürich und im Jahre 2008 wurde ihm eine außerplanmäßige Professur an der Universität Karlsruhe (heutiges Karlsruher Institut für Technologie (KIT)) verliehen.

Seine Forschungsschwerpunkte sind die Nachhaltige Energiewirtschaft, die Bewertung neuer Energietechnologien, Energiesystemanalysen sowie innovative Kraftstoffe und Antriebe im Verkehr. Weiterhin ist er in verschiedenen Gremien zur Elektromobilität, wie der Nationalen Plattform Elektromobilität, vertreten.

Internet: www.isi.fraunhofer.de

Kapitel 1: Motivation, Zielsetzung und Technologieauswahl

Inhaltsverzeichnis

Teil I Einleitende Betrachtungen

1	Motivation, Zielsetzung und Technologieauswahl	3
	Sandra Ullrich, Martin Wietschel, Tobias Bischkowski, Friedrich Schulte und Peter Markewitz	
1.1	Abkürzungen	11
	Literatur	12
2	Zukünftige Energiewelt – Szenarien und robuste Trends	13
	Klaus Biß, Peter Markewitz und Ulf Birnbaum	
2.1	Globale Energiebedarfsentwicklung	13
2.2	EU-27-Energieszenarien	21
2.3	Nationale Energieszenarien	25
2.4	Abkürzungen	28
	Literatur	29

Teil II Kraftwerkstechnik für fossile Brennstoffe plus CCS-Abscheidetechnik

3	Kohlekraftwerke	33
	Peter Markewitz, Richard Bongartz und Klaus Biß	
3.1	Technologiebeschreibung	33
3.1.1	Funktionale Beschreibung	35
3.1.2	Status quo und Entwicklungsziele	38
3.1.3	Technische Kenndaten	38
3.2	Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	41
3.2.1	Gesellschaft	41
3.2.2	Kostenentwicklung	42
3.2.3	Politik und Regulierung	43
3.2.4	Marktrelevanz	44
3.2.5	Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	45
3.2.6	Game Changer	45

3.3	Technologieentwicklung	46
3.3.1	Entwicklungsziele	46
3.3.2	F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	46
3.4	Abkürzungen	54
	Literatur	54
4	Gaskraftwerke	57
	Peter Markewitz, Richard Bongartz und Klaus Biß	
4.1	Technologiebeschreibung	58
4.1.1	Funktionale Beschreibung	58
4.1.2	Status quo und Entwicklungsziele	61
4.1.3	Technische Kenndaten	62
4.2	Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	64
4.2.1	Gesellschaft	64
4.2.2	Kostenentwicklung	64
4.2.3	Politik und Regulierung	65
4.2.4	Marktrelevanz	65
4.2.5	Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	66
4.2.6	Game Changer	67
4.3	Technologieentwicklung	67
4.3.1	Entwicklungsziele	67
4.3.2	F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	68
4.4	Abkürzungen	74
	Literatur	74
5	CO₂-Abscheidung	77
	Richard Bongartz, Peter Markewitz und Klaus Biß	
5.1	Technologiebeschreibung	77
5.1.1	Funktionale Beschreibung	77
5.1.2	Status quo und Entwicklungsziele	79
5.1.3	Technische Kenndaten	81
5.2	Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	82
5.2.1	Gesellschaft	82
5.2.2	Kostenentwicklung	82
5.2.3	Politik und Regulierung	83
5.2.4	Marktrelevanz	84
5.2.5	Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	84
5.2.6	Game Changer	84
5.3	Technologieentwicklung	85
5.3.1	Entwicklungsziele	85
5.3.2	F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	85

5.4	Abkürzungen	90
	Literatur	90
6	CO₂-Nutzung	93
	Richard Bongartz, Peter Markewitz und Klaus Biß	
6.1	Technologiebeschreibung	93
6.1.1	Funktionale Beschreibung	93
6.1.2	Status quo und Entwicklungsziele	95
6.1.3	Technische Kenndaten	96
6.2	Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	97
6.2.1	Gesellschaft	97
6.2.2	Kostenentwicklung	97
6.2.3	Politik und Regulierung	98
6.2.4	Marktrelevanz	98
6.2.5	Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	98
6.2.6	Game Changer	98
6.3	Technologieentwicklung	99
6.3.1	Entwicklungsziele	99
6.3.2	F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	99
6.4	Abkürzungen	99
	Literatur	100

Teil III Erneuerbare Energietechnologien

7	Stromerzeugung aus Windenergie	103
	Niklas Hartmann, Noha Saad Hussein, Michael Taumann, Verena Jülch und Thomas Schlegl	
7.1	Technologiebeschreibung	103
7.1.1	Funktionale Beschreibung	105
7.1.2	Status quo und Entwicklungsziele	108
7.1.3	Technische Kenndaten	110
7.2	Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	111
7.2.1	Gesellschaft	111
7.2.2	Kostenentwicklung	112
7.2.3	Politik und Regulierung	113
7.2.4	Marktrelevanz	113
7.2.5	Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	114
7.2.6	Game Changer	115
7.3	Technologieentwicklung	115
7.3.1	Entwicklungsziele	115
7.3.2	F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	116

7.4	Abkürzungen	120
	Literatur	120
8	Photovoltaik	123
	Verena Jülch, Niklas Hartmann, Noha Saad Hussein und Thomas Schlegl	
8.1	Technologiebeschreibung	123
8.1.1	Funktionale Beschreibung	123
8.1.2	Status quo und Entwicklungsziele	125
8.1.3	Technische Kenndaten	127
8.2	Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	128
8.2.1	Gesellschaft	128
8.2.2	Kostenentwicklung	128
8.2.3	Politik und Regulierung	130
8.2.4	Marktrelevanz	130
8.2.5	Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	131
8.2.6	Game Changer	131
8.3	Technologieentwicklung	132
8.3.1	Entwicklungsziele	132
8.3.2	F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	133
8.4	Abkürzungen	137
	Literatur	137
9	Solarthermische Kraftwerke	139
	Reiner Buck	
9.1	Technologiebeschreibung	139
9.1.1	Funktionale Beschreibung	139
9.1.2	Status quo und Entwicklungsziele	142
9.1.3	Technische Kenndaten	145
9.2	Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	147
9.2.1	Gesellschaft	147
9.2.2	Kostenentwicklung	147
9.2.3	Politik und Regulierung	148
9.2.4	Marktrelevanz	149
9.2.5	Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	149
9.2.6	Game Changer	150
9.3	Technologieentwicklung	150
9.3.1	Entwicklungsziele	150
9.3.2	F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	151
9.4	Abkürzungen	154
	Literatur	154

Teil IV Energiespeicher

10 Elektrochemische Speicher	157
Peter Stenzel, Johannes Fler und Jochen Linssen	
10.1 Technologiebeschreibung	157
10.1.1 Funktionale Beschreibung	157
10.1.2 Status quo und Entwicklungsziele	168
10.1.3 Technische Kenndaten	174
10.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	181
10.2.1 Gesellschaft	181
10.2.2 Kostenentwicklung	182
10.2.3 Politik und Regulierung	187
10.2.4 Marktrelevanz	191
10.2.5 Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	197
10.2.6 Game Changer	198
10.3 Technologieentwicklung	199
10.3.1 Entwicklungsziele	199
10.3.2 F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	200
10.4 Abkürzungen	209
Literatur	209
11 Druckluftspeicher	215
Fabio Genoese	
11.1 Technologiebeschreibung	215
11.1.1 Funktionale Beschreibung	215
11.1.2 Status quo und Entwicklungsziele	218
11.1.3 Technische Kenndaten	219
11.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	220
11.2.1 Gesellschaft	220
11.2.2 Kostenentwicklung	220
11.2.3 Politik und Regulierung	221
11.2.4 Marktrelevanz	222
11.2.5 Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	223
11.3 Game Changer	223
11.4 Technologieentwicklung	223
11.4.1 Entwicklungsziele	223

11.5	F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	224
11.6	Abkürzungen	227
	Literatur	227
12	Power-to-Gas	229
	Julia Michaelis und Fabio Genoese	
12.1	Technologiebeschreibung	229
12.1.1	Funktionale Beschreibung	229
12.1.2	Status quo und Entwicklungsziele	232
12.1.3	Technische Kenndaten	233
12.2	Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	234
12.2.1	Gesellschaft	234
12.2.2	Kostenentwicklung	235
12.2.3	Politik und Regulierung	235
12.2.4	Marktrelevanz	236
12.2.5	Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	239
12.2.6	Game Changer	239
12.3	Technologieentwicklung	240
12.3.1	Entwicklungsziele	240
12.3.2	F&E Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	240
12.4	Abkürzungen	243
	Literatur	243
13	Wasserstoffspeicherkraftwerke	245
	Fabio Genoese	
13.1	Technologiebeschreibung	245
13.1.1	Funktionale Beschreibung	245
13.1.2	Status quo und Entwicklungsziele	249
13.1.3	Technische Kenndaten	251
13.2	Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	254
13.2.1	Gesellschaft	254
13.2.2	Kostenentwicklung	254
13.2.3	Politik und Regulierung	255
13.2.4	Marktrelevanz	256
13.2.5	Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	257
13.2.6	Game Changer	258
13.3	Technologieentwicklung	258
13.3.1	Entwicklungsziele	258
13.3.2	F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	258
13.4	Abkürzungen	262
	Literatur	262

Teil V Elektrizitätsnetze

14 Übertragungsnetze	267
Sandra Ullrich	
14.1 Dynamisierung der Übertragungskapazität	267
14.1.1 Technologiebeschreibung	267
14.1.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	274
14.1.3 Technologieentwicklung	278
14.2 Flexible Drehstromübertragungstechnik	283
14.2.1 Technologiebeschreibung	283
14.2.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	290
14.2.3 Technologieentwicklung	294
14.3 Hybride AC/DC-Netzstrukturen	298
14.3.1 Technologiebeschreibung	298
14.3.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	303
14.3.3 Technologieentwicklung	308
14.4 Exkurs: Supraleiter	311
14.4.1 HTSL-Strombegrenzer	312
14.4.2 HTSL-Kabel	312
14.4.3 Politik und Regulierung	313
14.4.4 Marktrelevanz	313
14.4.5 F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	314
14.5 Abkürzungen	315
Literatur	316
15 Elektrische Verteilungsnetze im Wandel	323
Martin Braun, Erika Kämpf und Markus Kraicz	
15.1 Einführung	323
15.2 Bereitstellung von Systemdienstleistungen und IKT-Infrastruktur	328
15.3 Netzbetriebsmittel und beeinflussbare Kundenanlagen	331
15.4 Strategische Netzplanung	334
15.5 Zusammenfassung	337
15.6 Abkürzungen	338
Literatur	339

Teil VI Effizienztechnologien und Mikro-KWK

16 Mikro-Kraftwärmekopplungsanlagen (Mikro-KWK)	347
Ulf Birnbaum, Richard Bongartz und Philipp Klever	
16.1 Technologiebeschreibung	347
16.1.1 Funktionale Beschreibung	348
16.1.2 Status quo und Entwicklungsziele	352

16.1.3 Technische Kenndaten	354
16.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	356
16.2.1 Gesellschaft	356
16.2.2 Kostenentwicklung	356
16.2.3 Politik und Regulierung	357
16.2.4 Marktrelevanz	358
16.2.5 Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	359
16.2.6 Game Changer	360
16.3 Technologieentwicklung	361
16.3.1 Entwicklungsziele	361
16.3.2 F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	362
16.4 Abkürzungen	366
Literatur	366
17 Raumluftechnik und Klimakältesysteme	369
Ali Aydemir und Jan Steinbach	
17.1 Technologiebeschreibung	369
17.1.1 Funktionale Beschreibung	370
17.1.2 Status quo und Entwicklungsziele	372
17.1.3 Technische Kenndaten	373
17.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	373
17.2.1 Gesellschaft	373
17.2.2 Kostenentwicklung	373
17.2.3 Politik und Regulierung	374
17.2.4 Marktrelevanz	375
17.2.5 Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien und Technologiefeldern	377
17.2.6 Game Changer	377
17.3 Technologieentwicklung	378
17.3.1 Entwicklungsziele	378
17.3.2 F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	378
17.4 Abkürzungen	381
Literatur	381
18 Wärmepumpen	383
Ali Aydemir	
18.1 Technologiebeschreibung	383
18.1.1 Funktionale Beschreibung	384
18.1.2 Status quo und Entwicklungsziele	385
18.1.3 Technische Kenndaten	387
18.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	389
18.2.1 Gesellschaft	389

18.2.2 Kostenentwicklung	389
18.2.3 Politik und Regulierung	390
18.2.4 Marktrelevanz	390
18.2.5 Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	391
18.2.6 Game Changer	391
18.3 Technologieentwicklung	392
18.3.1 Entwicklungsziele	392
18.3.2 F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	392
18.4 Abkürzungen	396
Literatur	396
19 Stromeffizienz in den Sektoren Industrie, GHD und Haushalte	399
Tobias Fleiter	
19.1 Technologiebeschreibung	399
19.1.1 Funktionale Beschreibung	399
19.1.2 Status quo und Entwicklungsziele	400
19.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	405
19.2.1 Gesellschaft	405
19.2.2 Kostenentwicklung	405
19.2.3 Politik und Regulierung	406
19.2.4 Marktrelevanz	407
19.2.5 Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	407
19.2.6 Game Changer	408
19.3 Technologieentwicklung	408
19.3.1 Entwicklungsziele	408
19.3.2 F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	409
19.4 Abkürzungen	415
Literatur	415
20 Verbrauchssteuerung	417
Nele Friedrichsen	
20.1 Technologiebeschreibung	417
20.1.1 Funktionale Beschreibung	420
20.1.2 Status quo und Entwicklungsziele	430
20.1.3 Technische Kenndaten	431
20.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	431
20.2.1 Gesellschaft	431
20.2.2 Kostenentwicklung	434
20.2.3 Politik und Regulierung	435
20.2.4 Marktrelevanz	436
20.2.5 Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	437
20.2.6 Game Changer	437

20.3 Technologieentwicklung	438
20.3.1 Entwicklungsziele	438
20.3.2 F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	438
20.4 Abkürzungen	442
Literatur	442

Teil VII Elektromobilität

21 Elektromobilität	447
Wilfried Hennings und Jochen Linssen	
21.1 Technologiebeschreibung	447
21.1.1 Funktionale Beschreibung	447
21.1.2 Status quo und Entwicklungsziele	454
21.1.3 Trendentwicklung der Elektrofahrzeuge	455
21.2 Zukünftige Anforderungen und Randbedingungen	457
21.2.1 Gesellschaft	457
21.2.2 Kostenentwicklung von Elektrofahrzeugen	458
21.2.3 Politik und Regulierung	459
21.2.4 Marktrelevanz	461
21.2.5 Mögliche Wechselwirkungen mit anderen Technologien	464
21.2.6 Game Changer	465
21.3 Technologieentwicklung	465
21.3.1 Entwicklungsziele	465
21.3.2 F&E-Bedarf und kritische Entwicklungshemmnisse	466
21.4 Abkürzungen	470
Literatur	471
Sachverzeichnis	475