



## > Future Energy Grid

Migrationspfade ins Internet der Energie

Hans-Jürgen Appelrath, Henning Kagermann und  
Christoph Mayer (Hrsg.)

acatech **STUDIE**

Februar 2012

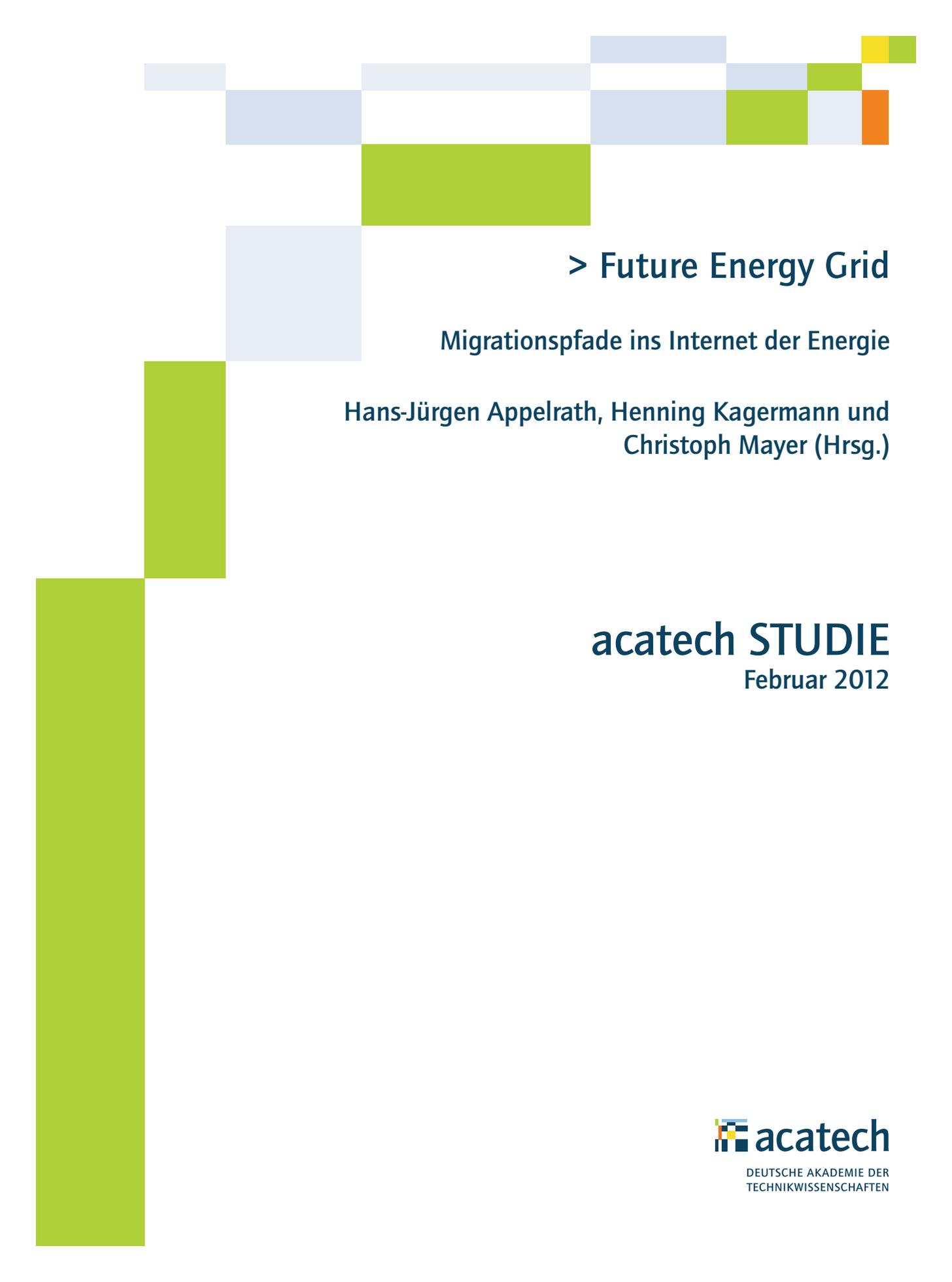


Springer



acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER  
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



## > Future Energy Grid

Migrationspfade ins Internet der Energie

Hans-Jürgen Appelrath, Henning Kagermann und  
Christoph Mayer (Hrsg.)

**acatech** STUDIE

Februar 2012

**Herausgeber:**

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath  
Universität Oldenburg  
Escherweg 2  
26121 Oldenburg  
E-Mail: [appelrath@offis.de](mailto:appelrath@offis.de)

Prof. Dr. Dr. E. h. Henning Kagermann  
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Hauptstadtbüro  
Unter den Linden 14  
10117 Berlin  
E-Mail: [kagermann@acatech.de](mailto:kagermann@acatech.de)

Dr. Christoph Mayer  
OFFIS e. V.  
Escherweg 2  
26121 Oldenburg  
E-Mail: [mayer@offis.de](mailto:mayer@offis.de)

**Reihenherausgeber:**

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2012

Geschäftsstelle  
Residenz München  
Hofgartenstraße 2  
80539 München

Hauptstadtbüro  
Unter den Linden 14  
10117 Berlin

T +49(0)89/5203090  
F +49(0)89/5203099

T +49(0)30/206309610  
F +49(0)30/206309611

E-Mail: [info@acatech.de](mailto:info@acatech.de)  
Internet: [www.acatech.de](http://www.acatech.de)

**Empfohlene Zitierweise:**

Appelrath, Hans-Jürgen/Kagermann, Henning/Mayer, Christoph (Hrsg.): *Future Energy Grid. Migrationspfade ins Internet der Energie* (acatech STUDIE), Heidelberg u.a.: Springer Verlag 2012.

ISSN 2192-6174/ISBN 978-3-642-27863-1/ISBN 978-3-642-27864-8 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-27864-8

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

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 dürften.

Koordination: Dr. Andreas König

Redaktion: Renate Danelius, Dr. Andreas König, Linda Tönskötter

Layout-Konzeption: acatech

Konvertierung und Satz: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS, Sankt Augustin

Gedruckt auf säurefreiem Papier

[springer.com](http://springer.com)

## > INHALT

VORWORT VON DR. PHILIPP RÖSLER, BUNDESMINISTER FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE	8
VORWORT VON GÜNTHER OETTINGER, EU-KOMMISSAR FÜR ENERGIE	9
VORWORT VON PROF. DR. HENNING KAGERMANN, PRÄSIDENT acatech	10
KURZFASSUNG	12
PROJEKT	16
1 EINLEITUNG UND GEGENSTAND DER STUDIE	18
2 SZENARIEN FÜR DAS FUTURE ENERGY GRID	34
2.1 Methodisches Vorgehen	34
2.1.1 Szenario-Vorbereitung	35
2.1.2 Szenariofeld-Analyse	36
2.1.3 Szenario-Prognostik	37
2.1.4 Szenario-Bildung	38
2.1.5 Szenario-Transfer	40
2.1.6 Anwendung	41
2.2 Schlüsselfaktoren	43
2.2.1 Schlüsselfaktor 1 – Ausbau der elektrischen Infrastruktur	43
2.2.2 Schlüsselfaktor 2 – Verfügbarkeit einer systemweiten IKT-Infrastruktur	47
2.2.3 Schlüsselfaktor 3 – Flexibilisierung des Verbrauchs	49
2.2.4 Schlüsselfaktor 4 – Energiemix	53
2.2.5 Schlüsselfaktor 5 – Neue Services und Produkte	56
2.2.6 Schlüsselfaktor 6 – Endverbraucherkosten	59
2.2.7 Schlüsselfaktor 7 – Standardisierung	61
2.2.8 Schlüsselfaktor 8 – Politische Rahmenbedingungen	65
2.3 Ableitung der Szenarien	70
2.4 Szenario „20. Jahrhundert“	75
2.4.1 Überblick	75
2.4.2 Wesentliche Entwicklungen	75
2.5 Szenario „Komplexitätsfalle“	78
2.5.1 Überblick	78
2.5.2 Wesentliche Entwicklungen	78
2.5.3 Erläuterungen und Annahmen	83

2.6 Szenario „Nachhaltig Wirtschaftlich“	83
2.6.1 Überblick	83
2.6.2 Wesentliche Entwicklungen	84
2.6.3 Erläuterungen und Annahmen	87
2.7 Zusammenfassung	88
<b>3 ROLLE DER IKT IM FUTURE ENERGY GRID</b>	<b>90</b>
3.1 Methodisches Vorgehen	90
3.2 Stand der IKT im Energieversorgungssystem 2012	93
3.2.1 IKT-Struktur in der Höchst- und Hochspannungsebene (380 kV; 220 kV)	93
3.2.2 IKT-Struktur in der Hochspannung (110 kV)	97
3.2.3 IKT-Struktur in der Mittelspannung (20 kV)	97
3.2.4 IKT-Struktur in der Niederspannung (0,4 kV)	98
3.3 Modell der Systemebenen	98
3.4 Technologiefelder	101
3.4.1 Technologiefeld 1 – Asset Management für Netzkomponenten	103
3.4.2 Technologiefeld 2 – Netzleitsysteme	104
3.4.3 Technologiefeld 3 – Wide Area Measurement-Systeme	107
3.4.4 Technologiefeld 4 – Netzautomatisierung	108
3.4.5 Technologiefeld 5 – FACTS	110
3.4.6 Technologiefeld 6 – IKT-Konnektivität	112
3.4.7 Technologiefeld 7 – Asset Management für dezentrale Erzeugungsanlagen	115
3.4.8 Technologiefeld 8 – Regionale Energiemarktplätze	117
3.4.9 Technologiefeld 9 – Handelsleitsysteme	119
3.4.10 Technologiefeld 10 – Prognosesysteme	120
3.4.11 Technologiefeld 11 – Business Services	122
3.4.12 Technologiefeld 12 – Virtuelle Kraftwerkssysteme	123
3.4.13 Technologiefeld 13 – Anlagenkommunikations- und Steuerungsmodule	125
3.4.14 Technologiefeld 14 – Advanced Metering Infrastructure	126
3.4.15 Technologiefeld 15 – Smart Appliances	128
3.4.16 Technologiefeld 16 – Industrielles Demand Side Management/Demand Response	130
3.4.17 Technologiefeld 17 – Integrationstechniken	132
3.4.18 Technologiefeld 18 – Datenmanagement	135
3.4.19 Technologiefeld 19 – Sicherheit	137
3.5 Technologische Sicht der Future Energy Grid-Szenarien	139
3.5.1 Szenario „Nachhaltig Wirtschaftlich“	139
3.5.2 Szenario „Komplexitätsfalle“	146
3.5.3 Szenario „20. Jahrhundert“	151
3.6 Zusammenfassung	155

<b>4</b>	<b>MIGRATIONSPFADE IN DAS FUTURE ENERGY GRID</b>	<b>158</b>
4.1	Methodisches Vorgehen	158
4.2	Beziehung zwischen den Technologiefeldern	158
4.2.1	Geschlossene Systemebene	159
4.2.2	IKT-Infrastrukturebene	167
4.2.3	Vernetzte Systemebene	168
4.2.4	Querschnittstechnologiefelder	186
4.2.5	Zusammenfassende Analyse der Querschnittstechnologien	193
4.3	Analyse der Migrationspfade	194
4.3.1	Kritische Technologiefelder und Entwicklungsschritte im Szenario „20. Jahrhundert“	195
4.3.2	Kritische Technologiefelder und Entwicklungsschritte im Szenario „Komplexitätsfalle“	197
4.3.3	Kritische Technologiefelder und Entwicklungsschritte im Szenario „Nachhaltig Wirtschaftlich“	199
4.3.4	Szenarioübergreifende Analyse	201
4.3.5	Migrationsphasen für das Szenario „Nachhaltig Wirtschaftlich“	201
4.3.6	Kernaussagen	205
4.4	Zusammenfassung	206
<b>5</b>	<b>INTERNATIONALER VERGLEICH</b>	<b>207</b>
5.1	Methodisches Vorgehen	207
5.2	Kriterien	208
5.2.1	Archetyp	209
5.2.2	Entwicklungsansatz	211
5.3	Auswahl der Länder	212
5.4	Ländersteckbriefe	213
5.4.1	Deutschland	213
5.4.2	USA	215
5.4.3	China	217
5.4.4	Europa	218
5.4.5	Dänemark	220
5.4.6	Frankreich	222
5.4.7	Brasilien	224
5.4.8	Indien	225
5.4.9	Italien	227
5.4.10	Russland	228
5.5	Modellprojekte	230
5.5.1	Amsterdam Smart City	230
5.5.2	Masdar City	231
5.5.3	Singapur	231
5.5.4	Stockholm	232

5.6 Ländervergleich	232
5.6.1 Rahmenbedingungen	233
5.6.2 Energiemix	234
5.6.3 Technologieführerschaft	235
5.6.4 Grundlegende Gestaltungsfaktoren und Positionierung der Länder	237
5.7 Zusammenfassung	239
<b>6 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EIN FUTURE ENERGY GRID</b>	<b>240</b>
6.1 Transformation der Energiesysteme zwischen Markt und staatlicher Lenkung	240
6.2 Herausforderung Integration fluktuierender, erneuerbarer Energien	242
6.2.1 Zubau zur Kompensation der Angebots-Inelastizität	242
6.2.2 Reduzierung der Inelastizität	243
6.2.3 Flexibilisierung der Nachfrage	245
6.2.4 Verstärkte europäische Marktintegration	245
6.3 Intelligentes Verteilnetz ist Voraussetzung für sinnvolles Smart Metering	246
6.4 Künftiges Marktdesign	248
6.4.1 Erneuerbare Energien im Markt	249
6.4.2 Regulierungsparadigma und FEG	250
6.4.3 Belohnung von Flexibilität	252
6.5 Intelligente Verteilnetze in einem zentralisierten europäischen Übertragungsnetz	253
6.6 Transformation von Übertragungs- und Verteilnetz zu einem FEG	253
6.7 Wechselwirkungen eines FEG mit Erzeugung	254
6.8 Zusammenfassung	255
<b>7 SMART GRID UNTER DEM GESICHTSPUNKT DER VERBRAUCHERAKZEPTANZ</b>	<b>257</b>
7.1 Ist-Stand der Forschung	257
7.1.1 Einführung	257
7.1.2 Status Quo	257
7.1.3 Kosten-Nutzen-Relation	258
7.1.4 Stromanbieter/Datenschutz	259
7.1.5 Persönliche Autonomie	259
7.1.6 Ökologische Aspekte	260
7.1.7 Aktuelle Wohnsituation	260
7.1.8 Akzeptanz intelligenter Haushaltsgeräte	260
7.1.9 Informationsverhalten/Kaufverhalten der Endverbraucher	261
7.1.10 Exkurs: Verbrauchergruppierungen	262
7.1.11 Generelle Anforderungen beim Kauf von EMS	262

7.2 Methodisches Vorgehen: Akzeptanz aus der Perspektive der Sinus-Milieus	263
7.2.1 Der Forschungshintergrund	263
7.2.2 Das Positionierungsmodell	263
7.2.3 Kurzcharakteristik der Sinus-Milieus	264
7.3 Identifikation von Zielgruppen-Potenzialen in den Sinus-Milieus	266
7.3.1 Wohnsituation und Haushaltsstruktur	267
7.3.2 Energie und Umwelt	269
7.3.3 Umweltbewusstsein in den Sinus-Milieus	269
7.3.4 Einstellung gegenüber und Anforderungen an moderne Technik	271
7.3.5 (Mobiles) Internet und Web 2.0	274
7.3.6 Datenschutz	277
7.3.7 Diffusionsmodell für Produktinnovationen	278
7.3.8 Entwicklung der Sinus-Milieus bis 2030	280
7.3.9 Ergebnisse der EnCT-Marktstudie	280
7.3.10 Fokussierung auf die Zielgruppe	284
7.4 Zusammenfassung	286
<b>8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>290</b>
<b>LITERATUR</b>	<b>294</b>
<b>ANHANG I: ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>311</b>
<b>ANHANG II: GLOSSAR</b>	<b>316</b>

# VORWORT

VON DR. PHILIPP RÖSLER, BUNDESMINISTER FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE



Der Weg in das neue Energiezeitalter ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. In Deutschland haben wir mit dem Energiepaket 2011 den Kurs festgelegt. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, die schwankende Einspeisung von Wind- und Sonnenenergie in stabile und bezahlbare Energiedienstleistungen zu integrieren.

Wind- und Sonnenkraft sind nicht immer und überall verfügbar. Der Strom aus erneuerbaren Energien muss von Nord nach Süd transportiert werden – dafür brauchen wir neue Netze. Und der Strom muss dann zur Verfügung stehen, wenn Unternehmen und Bürger ihn brauchen. Dazu müssen wir die Stromspeicher ausbauen. Zudem sind steuerbare Verbrauchseinheiten notwendig, damit sich auch die Energielast an die Fluktuationen der erneuerbaren Energien anpassen kann. Intelligente Systeme sorgen für eine hohe Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit, indem sie die Energieversorgung kontrollieren, steuern und regeln. Die Basis hierfür liefern die modernen Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT).

Den Startschuss zum intelligenten Stromversorgungssystem der Zukunft – dem Smart Grid – haben wir mit dem Leuchtturmprojekt „E-Energy“ im Jahr 2007 gegeben: In sechs Modellregionen werden in fachübergreifenden Forschungsprojekten neue IKT-basierte Verfahren, Anwendungen, Infrastrukturen und Rahmenbedingungen für das Smart Grid entwickelt und erprobt. Mit konkreten Praxisbeispielen wird gezeigt, welchen großen Beitrag die IKT schon heute für die Modernisierung der Energiewirtschaft leisten kann.

Jetzt geht der Blick noch weiter in die Zukunft. Komplementär zu den Aktivitäten in den E-Energy-Modellregionen haben wir auch das Projekt „Future Energy Grid“ der acatech in die E-Energy-Förderung einbezogen. Es analysiert die technologischen, wirtschaftlichen, politischen und gesellschaftlichen Erfolgsfaktoren für den Aufbau intelligenter Netze bis zum Jahr 2030. Dabei wird auch die internationale Entwicklung berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, was bei der Entwicklung von innovativen IKT-Konzepten und Softwaresystemen für den erfolgreichen Umbau der Energieversorgung wichtig ist. Das hilft auch bei der Lösung aktueller Fragen und bei der Entwicklung eines wachstumsfördernden Regulierungsrahmens.

Nun kommt es darauf an, dass dieses neue Wissen schnell und in großer Breite in den weiteren Fortschritt einfließen kann. Dazu trägt der vorliegende Sammelband bei. Ich danke den Herausgebern für ihre Initiative – und wünsche allen Leserinnen und Lesern viel Erfolg bei der Arbeit an innovativen Energiesystemen.

Ihr

Philipp Rösler  
*Bundesminister für Wirtschaft und Technologie*

# VORWORT

VON GÜNTHER OETTINGER, EU-KOMMISSAR FÜR ENERGIE



Die 2020-Agenda der EU enthält eine klare Botschaft. Wirtschaftswachstum und Beschäftigung in Europa werden zunehmend von Innovationen bei Produkten und Dienstleistungen abhängen. Zu diesen Innovationen zählen auch die intelligenten Netze, die der effizienten und nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen dienen. Im April 2011 hat die Europäische Kommission eine Mitteilung mit dem Titel „Intelligente Stromnetze: von der Innovation zur Realisierung“ vorgelegt. Wenn die bestehenden Netze nicht grundlegend modernisiert und ausgebaut werden, stagniert die regenerative Energieerzeugung. Ferner bleiben Chancen für Energieeinsparungen und Energieeffizienz ungenutzt.

Intelligente Netze sind das Rückgrat des emissionsfreien Stromsystems der Zukunft. Darüber hinaus bietet ihre Entwicklung die Chance, die Wettbewerbsfähigkeit und die weltweite Technologieführerschaft europäischer Anbieter zu fördern. Wir befinden uns in der Frühphase der konkreten Realisierung. In den letzten zehn Jahren wurden in der EU mehr als 5,5 Milliarden Euro in ca. 300 Projekte für intelligente Netze investiert. Derzeit sind in ca. 10 Prozent der Haushalte in Europa intelligente Zähler installiert, und dank dieser Zähler konnten die Verbraucher ihren Energieverbrauch um ganze 10 Prozent senken.

Die EU kann auf die Realisierung von intelligenten Stromnetzen hinwirken, indem sie einen einschlägigen Rechtsrahmen entwickelt, Investitionen anschiebt und Normungsaufträge erteilt. Die Entwicklung gemeinsamer technischer Normen für ein europaweites „Smart Grid“ stellt eine Herausforderung dar, ist aber unverzichtbar, wenn wir den Binnenmarkt für Energie bis 2014 vollenden und die letzten „Energieinseln“ in der EU bis 2015 in das Verbundnetz einbinden wollen. Die Europäische Kommission hat die europäischen Normungsorganisationen damit beauftragt, eu-

ropäische Normen für intelligente Zähler, Elektrofahrzeug-Ladegeräte und intelligente Netze zu erarbeiten. Damit die Normen fristgerecht bis 2012 verabschiedet werden, wird die Kommission die Umsetzung der Normungsaufträge überwachen und gegebenenfalls für die Ausarbeitung von Netzkodizes sorgen.

Aber wir müssen auch die Chancen nutzen, die sich außerhalb der EU-Grenzen bieten. So unterstützt die Kommission unter anderem die Entwicklung erneuerbarer Energien in den südlichen Mittelmeerländern. Ein Beispiel ist die Industrieinitiative DESERTEC, die durch die nachhaltige und klimafreundliche Erzeugung von Strom in den Wüsten Nordafrikas nicht nur die Versorgung vor Ort sicherstellen, sondern bis 2050 auch 15 Prozent des Strombedarfs in der EU decken will. Um dies zu ermöglichen, haben Vertreter von DESERTEC und MEDGRID am 24.11.2011 eine Kooperationsvereinbarung unterzeichnet. Da diese beiden Initiativen zusammen einen sehr beeindruckenden Cluster von Unternehmen und Know-how rund um das Mittelmeer bilden, habe ich mit Freude zur Kenntnis genommen, dass sie ihre Kräfte nun zum Wohle aller Beteiligten vereinen wollen.

Ich bin davon überzeugt, dass die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften unter ihrem Leitbild des nachhaltigen Wachstums durch Innovation auch zur Verwirklichung der energiepolitischen Ziele der EU beitragen wird. Gestützt auf ihr Netz herausragender Wissenschaftler aus verschiedensten Disziplinen berät sie Wirtschaft, Politik und Öffentlichkeit und wirkt so auf die Lösung globaler Herausforderungen hin, zu denen nicht zuletzt auch die Wettbewerbsfähigkeit, die Versorgungssicherheit und die Nachhaltigkeit in Europa zählen.

Günther H. Oettinger  
*EU-Kommissar für Energie*

# VORWORT

## VORWORT VON PROF. DR. HENNING KAGERMANN, acatech PRÄSIDENT



Im Gegensatz zu anderen klassischen Akademien arbeiten bei acatech – Deutschlands Nationaler Akademie der Technikwissenschaften – Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und anderen gesellschaftlichen Gruppen zusammen. In dieser besonderen Zusammensetzung orientieren aber auch wir

uns wie die meisten Akademien weltweit an den globalen Herausforderungen. Denn Energie- und Ressourceneffizienz aber auch der demografische Wandel werden zu neuen entscheidenden Randbedingungen für Innovationserfolg, und Innovation nicht Invention steht im Zentrum unserer Arbeit.

Insofern war es auch nicht überraschend, dass bei einer im Herbst 2011 durchgeführten Befragung von über 60 Experten kein Zukunftsthema auftauchte, das sich nicht in eines der fünf Handlungsfelder der Forschungsunion einordnen ließ: Klima/Energie, Gesundheit/Ernährung, Mobilität, Sicherheit und Kommunikation. Auffällig war jedoch die enorme Bedeutung, die den Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) als Schlüsseltechnologien und Enabler zugeschrieben wurde.

Haupttreiber zukunftsweisender Entwicklungen sind das Internet, eingebettete, softwareintensive Systeme sowie die technische und wirtschaftliche Verschmelzung der physikalischen Welt mit dem Cyber-Space zu Cyber-Physical Systems (CPS). CPS erfassen über Sensoren Daten aus der physikalischen Welt, verarbeiten sie und machen sie als netzbasierte Dienste für die unterschiedlichsten Anwendungen nutzbar. Über Aktoren, die elektronische Signale in mechanische Vorgänge umwandeln, wirken sie direkt auf die physikalische Welt ein. Physikalische Prozesse werden auf bislang einzigartige Art und Weise koordiniert und optimiert, neue

Nutzungspotenziale werden erschlossen. CPS begegnen uns überall, als Smart Cars, Smart Factories oder Smart Grids. Sie sind ein entscheidender Schritt zu einem global vernetzten Internet der Dinge, Daten und Dienste. acatech hat erst kürzlich mit „Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion“ und „Internet der Dienste“ zwei aktuelle Publikationen zu diesem Thema herausgegeben.

Der Trend zu netzbasierten Diensten war schon vor Jahren absehbar. Als wir auf dem ersten IT-Gipfel 2006 nach einem übergreifenden Motto suchten, einigten wir uns auf „Plattformen für vernetzte Systeme“. Als Leuchtturmprojekte wurden das Internet der Dinge definiert, das Internet der Dienste sowie als wichtigste Anwendung dieser Konzepte: das Internet der Energie, das später im Rahmen des Förderprogramms E-Energy in verschiedenen Modellregionen erprobt wurde. E-Energy als Weg ins Internet der Energie hat sich noch aus zwei anderen Gründen als sehr erfolgreich herausgestellt: Erkenntnisse aus dem Programm können auch auf andere leitungsgebundene Infrastrukturen wie für Gas und Wasser übertragen werden. Gleichzeitig war das Programm Wegbereiter für andere Innovationen, beispielsweise die Elektromobilität.

Unsere Akademie hat bereits 2009 zusammen mit den anderen Akademien, nämlich der Leopoldina und der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, ein integriertes Energieforschungsprogramm vorgelegt, in dem besonderer Wert auf die sogenannten „No-Regret-Maßnahmen“ gelegt wurde: Energieeffizienz, Speicher und intelligente Netze.

Der hier vorliegende Abschlussbericht des acatech Projektes „Future Energy Grid“ benennt erstmals die notwendigen

Technologien und Funktionalitäten für Migrationspfade in das Internet der Energie. Er zeigt auf, dass der Verschmelzungsprozess von Energietechnologie und IK-Technologie funktionieren kann.

Damit entstand eine breite neue Fakten- und Datengrundlage mit Nachschlagewerk-Charakter. Erste Zwischenergebnisse und Empfehlungen aus diesem Projekt haben bereits im Juni 2011 Eingang in den Endbericht der Ethikkommission „Sichere Energieversorgung“ gefunden und stießen auf breite Resonanz.

Die Analysen bestätigen: IK-Technologien sind ein maßgeblicher Enabler der Energiewende. Die zunehmenden Anforderungen bei der Messung und Regelung von Stromerzeugung, -transport, -speicherung und -verbrauch können nur durch die intelligente Verschmelzung von IK-Technologien und Energietechnik erfüllt werden. Die aus den Ergebnissen abgeleiteten Empfehlungen erscheinen parallel in der Reihe acatech POSITION unter dem Titel „Future Energy Grid. Informations- und Kommunikationstechnologien für den Weg in ein nachhaltiges und wirtschaftliches Energiesystem“. Die Kernaussage lautet: Es gibt keine prinzipiellen Hürden, die den Einsatz und den Ausbau von Smart Grids unmöglich machen. Gelingt es jedoch nicht, eine integrierte Gesamtstrategie zu implementieren, welche die wichtigsten Handlungsfelder aufeinander abstimmt, kann sich die Energiewende um viele Jahre verzögern oder schlimmstenfalls ganz scheitern. Smart Grids sind keine wünschenswerte Perspektive, sondern eine Notwendigkeit. Denn die derzeitige Elektrizitätsinfrastruktur ist auf die zukünftig verstärkt zu integrierenden Strommengen aus fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen wie Wind und Sonne nicht ausgelegt.

Mit dem Umbau der Elektrizitätsinfrastruktur kommen gewaltige Herausforderungen auf Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft zu. Der jüngst erschienene Bür-

gerreport des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung durchgeführten Bürgerdialogs „Energietechnologien für die Zukunft“ gibt für notwendige Maßnahmen deutliche Hinweise. Darüber hinaus bestätigt dieser Dialog, dass die Bürger die Reise in die Energieversorgung der Zukunft nicht nur als Trittbrettfahrer begleiten dürfen, sondern bereits frühzeitig aktiv in die Prozesse mit eingebunden werden müssen.

Danken möchte ich dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für die Förderung des Projekts im Rahmen des E-Energy-Programms. Mit der vorliegenden Analyse wird einmal mehr deutlich: Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende wird von der richtigen Kombination von technologischen Innovationen mit sozialen und Geschäftsmodellinnovationen abhängen. Die Komplexität der Systeme nimmt zu, auch bei der Energieversorgung. Nur durch koordinierte Zusammenarbeit aller Akteure und ein straffes Monitoring wird es uns gelingen, das in dieser Studie beschriebene Szenario „Komplexitätsfalle“ zu vermeiden und ein Smart Grid im Einklang mit den energiepolitischen Zielen der Energiewende in vollem Umfang zu etablieren.

Ihr



Henning Kagermann  
*acatech Präsident*

## KURZFASSUNG

Ziel und Tempo der Energiewende sind gesetzt. Bis 2022 will Deutschland aus der Stromproduktion in Kernkraftwerken aussteigen. Schon seit längerem ist geplant, dass die Energieerzeugung aus fossiler Primärenergie wie Gas und Kohle bis 2050 stufenweise weitgehend durch erneuerbare Energieträger abgelöst wird. Immense Herausforderungen kommen mit der Aufgabe „Energiewende“ auf Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Bevölkerung zu. Für die erfolgreiche Integration von Wind- und Sonnenenergie in das Energiesystem und die dadurch bedingten neue Prozesse, Marktrollen und Technologien ist die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) ein wichtiger Enabler. Das deutsche Elektrizitätssystem ist bereits im Umbruch. Schon seit einigen Jahren passt es sich an deutlich geänderte energie- und umweltpolitische Rahmenbedingungen an. Seit dem Jahr 2000 fördert und garantiert das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) die vorrangige Nutzung regenerativ erzeugten Stroms. Die verpflichtende Teilnahme der Industrie am Handel mit Emissionszertifikaten sowie das Ziel der Bundesregierung Treibhausgasemissionen zu mindern, tragen zudem zur erhöhten Energieeffizienz bei. Gleichzeitig wird neben diesen staatlichen Eingriffen in den Markt versucht, den Wettbewerb auf dem Energiemarkt zu verstärken. Die Weichen für den Weg von einer zentralen zu einer dezentralen und von einer konventionellen zu einer regenerativen Erzeugungsstruktur sind gestellt.

### **Regenerativ, dezentral und fluktuierend – Herausforderungen der Energiewende**

Der Wechsel zu erneuerbaren Energien bedeutet meist eine fluktuierende Stromerzeugung. Das Stromangebot, das aufgrund des zunehmenden Anteils von Windparks und Photovoltaik (PV)-Anlagen stärker fluktuiert, muss mit der ebenfalls schwankenden Nachfrage deckungsgleich zusammengeführt werden. Zusätzlich stellt sich das Problem, dass ein großer Teil dieses Angebots auf dezentraler Einspeisung beruht, also von Anlagen, die in das Verteilnetz einspeisen. Während der Stromfluss früher Top-Down, also von hoher zu niedriger Spannung verlief, kommt es nun vermehrt zu

Rückflüssen aus den unteren Spannungsebenen. An diesen bidirektionalen Stromverkehr muss die Netzinfrastruktur angepasst werden. So sollen beispielsweise vermehrt intelligente Ortsnetzstationen erbaut und damit das Verteilnetz für die Koordination bidirektionaler Lastflüsse ausgerüstet werden. Im gesamten Verteilnetz erhöht sich der Bedarf für die zeitlich hoch aufgelöste Messung, Regelung und Automatisierung des Stromflusses. Zusätzlich zu den aktuellen Entwicklungen auf der Erzeugerseite wird sich zukünftig die Verbrauchscharakteristik verändern: Elektromobilität, Wärmepumpen und weitere Verbraucher werden eine neue Dynamik in das Verteilnetz bringen und in das Smart Grid eingebunden sein. Variable Tarife können ebenfalls zu einer erhöhten Netzbelastung führen. Bei weiterer Umstellung auf erneuerbare Energieträger ist damit zu rechnen, dass zunehmend Strom auch zur Bereitstellung von Wärme und Mobilitätsenergie dient.

Um erneuerbare Energien einzubinden, muss die Netzinfrastruktur auf allen Ebenen ausgebaut werden. Das Stromsystem der Zukunft wird neben dem Zubau großer Trassen für die Langstreckenübertragung vor allem im Bereich des Verteilnetzes eine deutliche Veränderung erfahren. Zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage werden Speicher eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Je nach betrachteter Zeitskala (vom Subsekundenbereich bis zum saisonalen Ausgleich) werden verschiedene Technologien zum Einsatz kommen. Parallel zu den technischen Veränderungen kommt es auf dem Energiemarkt zu neuen Entwicklungen. Auf der einen Seite wird der Wettbewerb deutlich zunehmen, auf der anderen Seite wird zunehmend direkt in den Markt eingegriffen werden müssen, um Klimaschutzziele zu erreichen und den Verbraucher zu schützen.

Einhergehend mit den technischen Veränderungen werden sich also auch die Marktstrukturen deutlich wandeln, Endverbraucher und Kleinsthersteller werden vermehrt direkt am Marktgeschehen teilhaben. Neue Vertriebs- und Geschäftsmodelle, die durch den vermehrten Einsatz von

IKT umsetzbar werden, schaffen Anreize für Verbraucher, ihr Energieverhalten zu ändern. Durch die große installierte Leistung erneuerbarer Erzeugungsanlagen wird es regelmäßig zu Situationen kommen, in denen im Gesamtsystem mehr Strom produziert als aktuell nachgefragt wird. Für diese Situation müssen neue Märkte oder Marktregeln geschaffen werden, die das energiewirtschaftliche Zieldreieck realisieren.

Sicherheit und Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung sind für eine hoch technisierte Industrienation bei dem Weg in eine nachhaltige Energieversorgung ein Muss. IKT und entsprechende Kommunikationsstandards können zur Bewältigung dieser Herausforderungen beitragen. Durch die Nutzung von IKT sollen eine verbesserte Integration der dezentralen Erzeuger und die Abstimmung von Erzeugung und Verbrauch sowie ein größerer Kundennutzen erreicht werden. Die grundsätzlichen Herausforderungen sind sowohl in der Energiewirtschaft als auch in der Politik gleichermaßen bekannt. An vielen Stellen wird bereits an einer Lösung gearbeitet. Das zeigt das Beispiel der sechs Modellregionen im Rahmen der E-Energy-Initiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

#### Vorgehen und Aufbau der Studie

Die vorliegende Studie beschreibt, welcher Migrationspfad in das „Future Energy Grid“ (FEG) bis zum Jahr 2030 zu beschreiten ist.

Dazu wurde ermittelt, auf welche möglichen Zukunftsszenarien sich dieser Migrationspfad beziehen muss. Um die Szenarien zu erstellen, wurden die maßgeblichen Schlüsselfaktoren ermittelt, nämlich Ausbau der elektrischen Infrastruktur, Verfügbarkeit einer systemweiten IKT-Infrastruktur, Flexibilisierung des Verbrauchs, Energiemix, neue Services und Produkte, Endverbraucherkosten, Standardisierung und die politischen Rahmenbedingungen.

Diese acht Schlüsselfaktoren werden in unterschiedlichen Ausprägungen miteinander kombiniert und zu drei konsistenten Szenarien für das Jahr 2030 verbunden:

1. „20. Jahrhundert“: Das Energieversorgungssystem basiert auf zentraler nicht fluktuierender Erzeugung, welche den Lastfolgebetrieb wie im 20. Jahrhundert erlaubt. Es gibt nur sehr wenige neue IKT-basierte Dienstleistungen am Markt. Es wird in der Regel nicht auf variable Tarife gesetzt. Die Gesetzgebung hat diesen Weg konsequent umgesetzt und den Wettbewerb gestärkt.
2. „Komplexitätsfalle“: Obwohl ein starker gesellschaftlicher und politischer Wille zur Energiewende besteht, konnte dieser nicht operativ in ein einheitliches Gesetzeswerk umgesetzt werden. Die maßgeblichen Akteure konnten sich nicht auf ein einheitliches Vorgehen und einheitliche Standards einigen. Dies führt auch zu Problemen beim Ausbau der elektrischen Infrastruktur. Das Angebot neuer Energiedienstleistungen ist auf wenige grundlegende Funktionen beschränkt. Die Uneinheitlichkeit der Entwicklungen schlägt sich in hohen Kosten für das Energieversorgungssystem nieder.
3. „Nachhaltig Wirtschaftlich“: Der Umbau des Energiesystems ist bis 2030 erfolgreich verlaufen. Smart Grids haben dazu einen wichtigen Beitrag geleistet. Durch eine Abstimmung zwischen Energiepolitik, Gesellschaft, Energieversorgern und Technologieanbietern konnte der Umbau nach einem langfristigen Plan gelingen. Die Versorgung mit elektrischer Energie basiert überwiegend auf regenerativen Energiequellen. Die systemweite IKT-Infrastruktur bildet gemeinsam mit den bedarfsgerecht ausgebauten Übertragungs- und Verteilnetzen das Rückgrat für den effizienten Betrieb der Energieversorgung sowie die Plattform für eine Vielzahl neuer Services, die als Treiber für neuartige Geschäftsmodelle dienen. Der Wettbewerb auf dem Energiemarkt hat zugenommen.

Im nächsten Schritt ist die Frage zu beantworten, welcher Technologiefortschritt für das jeweilige Szenario notwendig ist. Grundsätzlich lassen sich alle relevanten IKT-nahen Technologiefelder drei (IKT-) Systemebenen zuordnen: der geschlossenen Systemebene, die im Wesentlichen in der Hand der Netzverantwortlichen liegt, der vernetzten Systemebene mit einer Vielzahl von Akteuren und der IKT-Infrastrukturebene, die den Informationsaustausch sicherstellt.

Die mögliche Entwicklung jedes Technologiefelds lässt sich auf bis zu fünf Entwicklungsschritte bis zum Jahr 2030 unterteilen. Für jedes der Szenarien wird dargestellt, bis zu welchem Grad sich ein Technologiefeld entwickeln muss, damit das in dem jeweiligen Szenario beschriebene Gesamtsystem realisiert werden kann. Eine große Herausforderung ist die wechselseitige logische Abhängigkeit der Technologien in ihrer Entwicklung. Um den Migrationspfad zu ermitteln, wurden daher alle Abhängigkeiten zwischen den Entwicklungsschritten ermittelt. So entsteht pro Szenario eine Gesamtübersicht, die aufgrund der ermittelten Abhängigkeiten eine zeitliche Abfolge der notwendigen Entwicklungen erlaubt.

### Der Weg zum Future Energy Grid

Das Szenario „Nachhaltig Wirtschaftlich“ entspricht am ehesten den Zielen der Energiewende und wurde daher besonders analysiert. Es stellt sich heraus, dass die Entwicklung bis 2030 in drei Phasen erfolgt:

1. In der Konzeptionsphase (2012-2015) insbesondere in der geschlossenen Systemebene werden die Weichen für die weitere Entwicklung gestellt.
2. Die Integrationsphase (2016-2020) ist dadurch gekennzeichnet, dass die Systeme der geschlossenen Systemebene zunehmend Zugriffsmöglichkeiten auf die Komponenten der vernetzten Systemebene erlangen. Die zügige Entwicklung der IKT-Infrastrukturebene ist dazu ein wichtiger „Trigger“.
3. In der Fusionsphase (2021-2030) verschmelzen sowohl die geschlossene Systemebene mit der vernetzten Systemebene als auch das elektrotechnische System mit dem IKT-System. Die nun hohe gegenseitige Abhängigkeit zwischen geschlossener und vernetzter Systemwelt verlangt insbesondere nach einem hohen Entwicklungsstand bei den Querschnittstechnologien und der IKT-Konnektivität. Der Sicherheit kommt eine große Bedeutung zu.

In jeder Phase gibt es kritische Abhängigkeiten bei der Technologieentwicklung. Auf diese kritischen Punkte muss besonderes Augenmerk gelegt werden.

Neben den notwendigen technologischen Entwicklungsschritten bedarf der erfolgreiche Umbau des Energienetzes auch politisch, ökonomisch, gesellschaftlich und international förderlicher Rahmenbedingungen. Ein Future Energy Grid bietet nicht nur eine Lösung für die Energiewende. Es ist auch mit wirtschaftlichen Perspektiven für Deutschland verbunden. Um Deutschlands Chancen als Vorreiter und Exporteur von Smart-Grid-Technologien einzuschätzen, ist die Entwicklung des Energiesystems hierzulande im Vergleich mit ausgewählten Ländern international einzuordnen. Deutschland hat die Chance zur Technologieführerschaft im Bereich Smart Grids. Laufende Demonstrationsprojekte für Smart-Grid-Technologien, beispielsweise die Modellregionen der E-Energy-Initiative des BMWi, helfen Deutschland dabei, ausländische Märkte zu erschließen. Ein sich abzeichnender Fachkräftemangel kann hier jedoch hinderlich wirken. Zum Teil investieren andere Länder erheblich mehr in Smart Grids und haben in einigen Bereichen einen Technologievorsprung.

Die Gesetzgebung muss angesichts der einschneidenden Veränderungen deutlich angepasst werden, um sowohl den Wettbewerb als auch die erneuerbare Einspeisung so zu fördern, dass eine große Wertschöpfung durch den Einsatz intelligenter Technologien möglich wird. Maßnahmen für

die Integration erneuerbarer Energien in ein Marktdesign, das auch die Belange des Verteilnetzes berücksichtigt, werden hier beschrieben. Ein breiter Rollout von elektronischen Zählern wird sowohl aus technischer als auch Marktsicht kritisch gesehen.

Die Umgestaltung des Energiesystems muss den Verbraucher mitnehmen. Auch wenn diese Studie im Kern die technologischen Migrationspfade behandelt, werden Akzeptanzfragen intensiv betrachtet. Verbraucher sind in die Entwicklung des Smart Grids eingebunden und stehen bei vielen Entwicklungen sogar im Zentrum. „Die Verbraucher“ sind keine homogene Masse, sondern unterscheiden sich deutlich nach Wertvorstellungen, Einkommen, Präferenzen usw. Daher wurde anhand von „Milieus“ untersucht, wie eine sinnvolle Einbindung aussieht oder auch welche Milieus eine Vorreiterrolle einnehmen können. Dies sind für die hier betrachteten Themen die sogenannten „Liberal-intellektuellen“ und „Performer“, also Milieus mit hohem Einkommen und die gegenüber Neuerungen aufgeschlos-

sen sind. Eine offene Kommunikation über Kosten, Nutzen, Risiken und Gestaltungsmöglichkeiten ist für die anderen Verbrauchergruppen von großer Bedeutung. Ein Mitwirken an den Entwicklungen ist dabei ein wichtiger Faktor, um Akzeptanz zu erreichen. Setzen sich attraktive Produkte im Umfeld des Future Energy Grids am Markt durch, stellt sich die Frage nach der Akzeptanz bereits nicht mehr.

Die vorliegende Studie möchte einen Beitrag leisten, die oft unübersichtliche Themenvielfalt in einen strukturierten Zusammenhang zu stellen und so zur Diskussion um den besten Weg in das zukünftige IKT-gestützte Energieversorgungssystem maßgeblich beitragen.

Aufgrund der notwendigen Verschmelzung von IKT und Energietechnik im Future Energy Grid und der vielen Themen wurde die Studie in einem interdisziplinären Projekt erarbeitet, an dem Technikexperten aus verschiedenen Disziplinen und Branchen als auch Experten für Ökonomie und Sozialwissenschaften beteiligt waren.

# PROJEKT

Auf Grundlage dieser Studie entstand in dem Projekt auch die acatech POSITION *Future Energy Grid – Informations- und Kommunikationstechnologien für den Weg in ein nachhaltiges und wirtschaftliches Energiesystem.*

## > AUTOREN

- Christian Dänekas, OFFIS
- Dr.-Ing. Andreas König, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Christoph Mayer, OFFIS
- Sebastian Rohjans, OFFIS
- Stefan Bischoff, IWI-HSG Universität St. Gallen
- Dr. Andreas Breuer, RWE Deutschland AG
- Torsten Drzisga, Nokia Siemens Networks Deutschland GmbH & Co. KG
- Jan Hecht, SINUS Markt- und Sozialforschung GmbH
- Michael Holtermann, European School of Management and Technology ESMT
- Dr. Till Luhmann, BTC AG
- Mathias Maerten, Siemens AG
- Dr. Michael Stadler, BTC AG
- Prof. Dr. Orestis Terzidis, SAP AG
- Wolfgang Plöger, SINUS Markt- und Sozialforschung GmbH
- Thomas Theisen, RWE Deutschland AG
- Prof. Dr. Felix Wortmann, IWI-HSG Universität St. Gallen
- Prof. Dr. Anke Weidlich, SAP AG
- Dr. Jens Weinmann, European School of Management and Technology ESMT
- Prof. Dr. Robert Winter, IWI-HSG Universität St. Gallen
- Carsten Wissing, OFFIS

## > PROJEKTLLEITUNG

- Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath, Universität Oldenburg/OFFIS/acatech
- Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. Henning Kagermann, acatech Präsident

## > PROJEKTGRUPPE

- Prof. Dr. rer. nat. habil. Frank Behrendt, TU Berlin/acatech
- Dr. Andreas Breuer, RWE Deutschland AG
- Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Broy, TU München/acatech
- Christoph Burger, European School of Management and Technology ESMT
- Christian Dänekas, OFFIS
- Torsten Drzisga, Nokia Siemens Networks Deutschland GmbH & Co. KG
- Dr. Jörg Hermsmeier, EWE AG
- Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier, TU Berlin/acatech
- Ludwig Karg, B.A.U.M. Consult
- Prof. Dr. Jochen Kreusel, Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
- Dr. Till Luhmann, BTC AG
- Mathias Maerten, Siemens AG
- Prof. Dr. Friedemann Mattern, ETH Zürich/acatech
- Dr. Christoph Mayer, OFFIS
- Sebastian Rohjans, OFFIS
- Dr. Michael Stadler, BTC AG
- Prof. Dr. Orestis Terzidis, SAP AG
- Thomas Theisen, RWE Deutschland AG
- Prof. Dr. Klaus Vieweg, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg/acatech
- Prof. Dr. Anke Weidlich, SAP AG
- Dr. Michael Weinhold, Siemens AG
- Carsten Wissing, OFFIS

## > AUFTRÄGE/MITARBEITER

### European School of Management and Technology, ESMT

- Michael Holtermann
- Dr. Jens Weinmann

### IWI-HSG Universität St. Gallen

- Prof. Dr. Felix Wortmann
- Prof. Dr. Robert Winter
- Stefan Bischoff

### SINUS Markt- und Sozialforschung GmbH

- Wolfgang Plöger
- Jan Hecht

## > KONSORTIALPARTNER

OFFIS, Institut für Informatik, Universität Oldenburg

## > PROJEKTKOORDINATION

- Christian Dänekas, OFFIS
- Dr. Ulrich Glotzbach, acatech Geschäftsstelle
- Dr.-Ing. Andreas König, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Christoph Mayer, OFFIS

## > PROJEKTLAUFZEIT

01.09.2010 bis 29.02.2012

## > FINANZIERUNG

Das Projekt wurde im Rahmen der E-Energy-Initiative vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert (Förderkennzeichen 01ME10013 und 01ME10012A).

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Projektträger: Projektträger im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

acatech dankt außerdem den folgenden Unternehmen für ihre Unterstützung: EWE AG/BTC AG, Nokia Siemens Networks GmbH & Co. KG, RWE Deutschland AG, SAP AG, Siemens AG

acatech bedankt sich bei allen Experten, die an der Befragung teilgenommen haben; zudem bei den Personen und Institutionen, die der Projektgruppe beratend zur Seite gestanden haben.

- Dr. Petra Beenken, OFFIS
- Dr. Heiko Englert, Siemens AG
- Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
- Dr. Oliver Franz, RWE Deutschland AG
- Ingo Gast, Siemens AG
- Roland Grupe, OFFIS
- Claus Kern, Siemens AG
- Dr. Louis R. Jahn, Electrical Edison Institute (EEI), Washington D.C.
- Torsten Knop, RWE Deutschland AG
- Wolfgang Krauss, SAP AG
- Jun.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff, OFFIS
- Dr. Andreas Litzinger, Siemens AG
- Dr.-Ing. Mathias Uslar, OFFIS
- Dr. Thomas Werner, Siemens AG

# 1 EINLEITUNG UND GEGENSTAND DER STUDIE

Ziel und Tempo der Energiewende sind gesetzt. Der Ausstieg aus der Stromproduktion in Kernkraftwerken soll bis 2022 geschafft sein. Eine Elektrizitätserzeugung, die auf erneuerbaren Energien beruht, soll die bisherige Erzeugung auf der Grundlage von Kohle, Kernbrennstoffen und Erdgas bis 2050 stufenweise weitgehend ablösen und damit maßgeblich zu den Klimaschutzzielen der Bundesregierung beitragen. Der Weg zu diesen Zielen ist für die Beteiligten hingegen noch nicht deutlich einsehbar. Viele offene Fragestellungen technischer, ökonomischer, legislativer und gesellschaftlicher Natur verstellen den Blick auf eine klare Strategie zur Erreichung der energiepolitischen Ziele. Vielschichtige Aufgaben und immense Herausforderungen kommen mit der Mammutaufgabe „Energiewende“ auf Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Bevölkerung zu. Ein wichtiger Enabler für die erfolgreiche Integration von Wind- und Sonnenenergie sowie für neue Prozesse, Marktrollen und Technologien ist die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT). An diesem Punkt setzt die hier vorliegende Studie an.

- Wie kann die IKT zum Gelingen der Energiewende beitragen?<sup>1</sup>
- Wie können technologische Migrationspfade in das zukünftige Energiesystem aussehen?
- Was kann und muss parallel zur Technologieentwicklung getan werden, damit die Energiewende im Hochindustrialand Deutschland erfolgreich und beispielhaft für andere Staaten umgesetzt werden kann?

Die hier vorliegenden Analysen, Konzepte und Visionen zur Beantwortung dieser Fragen konzentrieren sich dabei auf den Beitrag aus der IKT sowie auf die notwendigen und möglichen Entwicklungen in diesem Bereich. Dabei kommt der Verschmelzung von IKT und Energietechnik (elektrische Netzinfrastruktur, Speicher, Stromerzeugungs- sowie -nutzungstechnologie) eine besondere Rolle zu.

Auf der Grundlage des aktuellen Stands der Forschung und Entwicklung erfasst die Studie die derzeitigen Veränderungen des Elektrizitätssystems und wirft mithilfe von Annahmen für die zukünftige Technologie-, Markt- und Politikentwicklung einen konstruktiven Blick aus der Vogelperspektive auf den Weg in das „Internet der Energie“ (IdE) bis zum Jahr 2030. Für insgesamt drei Szenarien, die den Zukunftsraum umreißen, werden 19 systembestimmende Technologiefelder (Kapitel 3) identifiziert und darauf aufbauend detaillierte technologische Migrationspfade (Kapitel 4) in das Elektrizitätssystem der Zukunft abgeleitet. Über einen internationalen Vergleich mit den Entwicklungen im europäischen und außereuropäischen Ausland wird darüber hinaus der Benchmark für die aktuellen Entwicklungen in Deutschland beschrieben und das Optimierungssowie Lernpotenzial benannt (Kapitel 5). Begleitend zu den technologischen Fragestellungen werden auch ausgewählte Aspekte zu Optionen und Restriktionen bei der Rahmengesetzgebung und Regulierung (Kapitel 6) sowie zur Technikakzeptanz in der Bevölkerung (Kapitel 7) adressiert.

Die vorliegende Studie möchte einen Beitrag leisten, die oft unübersichtliche Themenvielfalt in einen strukturierten Zusammenhang zu stellen und so an der Diskussion um den besten Weg in das zukünftige IKT-gestützte Energieversorgungssystem maßgeblich teilhaben.

## **Das historisch gewachsene Elektrizitätssystem in Deutschland bis zum Beginn des 21. Jahrhunderts**

Den Ausgangspunkt für die Energiewende stellt ein über Jahrzehnte gewachsenes zuverlässiges und bewährtes Elektrizitätssystem dar. Infrastruktur und Dynamik des deutschen Stromsystems lassen sich folgendermaßen skizzieren:

Die Erzeugungsstruktur für Strom in Deutschland ist systembedingt durch den gerichteten Lastfluss (Erzeugung – Transport – Verteilung – Nutzung) von zentralen Großer-

<sup>1</sup> Einen Überblick über die Forschungsfragen gibt Appelrath et al. 2011.

zeugern, wie zum Beispiel Kernkraft- und Kohlekraftwerke, geprägt. Die zentralen Großkraftwerke speisen den Strom auf der Höchstspannungsebene (220 bis 380 kV) ein. Die Hochspannungsnetze (110 kV) dienen zwar als Einspeisernetz für kleinere Kraftwerke und stehen heutzutage vor allem für größere Windparks zur Verfügung, galten aber in der ursprünglichen Planung als Weiterverteilungssystem, um den Strom über Mittelspannungsnetze (10 bis 40 kV) bereitzustellen. In Verbrauchernähe (zum Beispiel am Ortsrand) wird der Strom in Umspannwerken zunächst auf die Mittel- und schließlich in Ortsnetzstationen auf die Niederspannungsebene (230 bis 400 V) transformiert und dem Endverbraucher zur Verfügung gestellt.

Alternativ zu der Unterteilung in diese vier Spannungsebenen kann das Netz entsprechend der jeweiligen Funktion in das Übertragungs- und das Verteilnetz untergliedert werden. Für den Langstreckentransport, beispielsweise zwischen Nord- und Süddeutschland, wird das Übertragungsnetz genutzt, welches durch die Gesamtheit der Netzteile auf der Höchstspannungsebene gebildet wird. Das Übertragungsnetz ist durch die meist überirdisch verlaufenden Freileitungen mit den sichtbaren Strommasten charakterisiert. Es gibt derzeit vier Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) in Deutschland. Für den Transport in Verbrauchernähe oder den Kurzstreckentransport wird das Verteilnetz genutzt, in dem die Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze zusammengefasst werden. Hier wird der Strom zumeist über Erdkabel übertragen. Im Vergleich zu der Zahl der ÜNB ist die Zahl der Verteilnetzbetreiber (VNB) in Deutschland mit etwa 866 deutlich höher. Von den insgesamt 1,73 Millionen km Netzlänge im Jahr 2009 in Deutschland waren 35 000 km (ca. 2 Prozent) dem Höchstspannungsnetz und damit dem Übertragungsnetz zuzuordnen. Mit 76 800 km (ca. 4 Prozent) in der Hochspannungsebene, 497 000 km (ca. 29 Prozent) in der Mittelspannungsebene und 1,12 Millionen km (65 Prozent) in der Niederspannungsebene liegt

der Anteil für das Verteilnetz demnach bei rund 98 Prozent des gesamten deutschen Netzes.<sup>2</sup> Die Verbindung der verschiedenen Netzabschnitte und Spannungsebenen wird durch Kuppelstellen, Schaltanlagen und rund 550 000<sup>3</sup> Transformatoren geregelt.

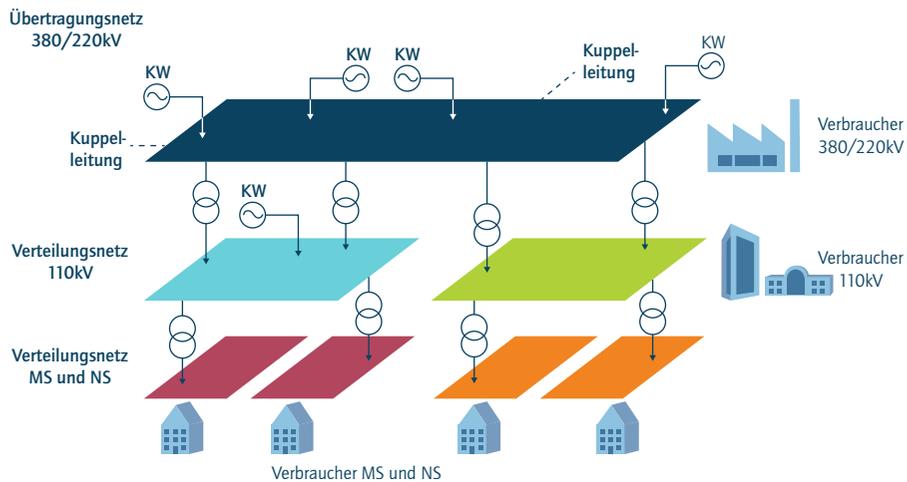
Der Stromfluss im Netz war in der Vergangenheit stets von den großen Erzeugern hin zu den Verbrauchern gerichtet. Bidirektionale Flüsse waren in der ursprünglichen Versorgungsaufgabe nicht abgebildet und traten in der Vergangenheit lediglich im Übertragungsnetz, also bei der Langstreckenübertragung auf. Im Verteilnetz verlief der Stromfluss stets in eine Richtung. Die Stromerzeugung folgte der Last, das heißt dem Stromverbrauch. Dies ist in weiten Teilen auch heute noch der Fall: Steigt der Stromverbrauch, wird die Leistung einzelner Kraftwerke erhöht oder es werden zusätzliche Kraftwerke hinzugeschaltet. Umgekehrt verhält es sich, wenn die Last abnimmt. In Deutschland – wie auch in allen anderen Ländern – besteht also ein lastgeführtes Elektrizitätssystem. Die Verbraucher dürfen dem Netz zu jeder Zeit so viel Strom entnehmen, wie sie möchten bzw. wie es die physikalischen Gegebenheiten der Netzinfrastruktur zulassen. Die vom Gesetzgeber auferlegte Pflicht zur Bereitstellung einer an diese Bedingungen angepassten Netzinfrastruktur, das heißt die Errichtung und Aufrechterhaltung der Netzinfrastruktur sowie die Gewährleistung der Netzverfügbarkeit, obliegt für das Verteilnetz den VNB und für das Übertragungsnetz den ÜNB.

Die Versorgung der Verbraucher (private Haushalte und Gewerbekunden < 100 000 kWh/a) mit Strom aus dem Netz richtet sich nach den Standardlastprofilen, welche auf Erfahrungswerten zum Stromverbrauch in der Vergangenheit beruhen und regelmäßig aktualisiert werden. Nach diesen Profilen speisen die Erzeuger im 15-Minuten-Takt bestimmte Strommengen in das Netz ein, ohne dabei genau zu wissen, wie der exakte Verbrauch bei den Endkunden sich zu

<sup>2</sup> BNetzA 2010a, S. 84-85.

<sup>3</sup> BDEW 2011a.

Abbildung 1: Aufbau, Bestandteile und Aufgaben der Elektrizitätsinfrastruktur (verändert nach RWE)



diesem Zeitpunkt wirklich gestaltet. Unstimmigkeiten zwischen geschätztem Lastprofil und tatsächlichem Verbrauch werden kurzfristig ausgeregelt. Für diese konventionelle Erzeugungs- und Versorgungscharakteristik ist die bestehende Netzinfrastruktur konzipiert und ausgelegt (siehe Abbildung 1).

Neben dem Technik-Know-how ist zum Verständnis des Elektrizitätssystems in Deutschland auch die Kenntnis des Marktes vonnöten. Rund 83 Prozent des Stroms in Deutschland wurden im Jahr 2009 von vier großen Energieversorgungsunternehmen (EVU) erzeugt.<sup>4</sup> Neben diesen Erzeugungsunternehmen gibt es rund 300<sup>5</sup> Stadtwerke bzw. regionale Erzeuger und Versorger mit Erzeugungseinheiten von mehr als 1 MW elektrische Leistung. Diese tragen zusammen mit einer stark schwankenden Anzahl weiterer Klein- und Kleinstzeuger zum Rest der innerdeutschen Stromerzeugung bei. Bis etwa Mitte der 1990er Jahre wurden die Netze zum Großteil von den EVUs betrieben und waren in de-

ren Besitz. Somit lag die gesamte Wertschöpfungskette, von der Erzeugung und dem Vertrieb bis hin zur Bereitstellung, zumeist in einer Hand. Seit 1998 ist im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) die eigentumsrechtliche Entflechtung der Stromproduktion und -verteilung (Unbundling) geregelt, die seitdem zu einer substantiellen Veränderung der Wettbewerbssituation geführt hat. Das Unbundling wurde energiepolitisch von der Bundesregierung über das EnWG bzw. von der EU über die Binnenmarktrichtlinie Elektrizität eingeführt, um Monopolstellungen zu vermeiden und mehr Wettbewerb unter den Stromanbietern zu gewährleisten. Dieser Prozess dauert bis heute an und die dadurch entstandenen Markt- und Anbieterstrukturen prägen das aktuelle Bild der Energiewirtschaft.

Die Nutzung der IKT innerhalb dieser Netzinfrastruktur hat in den letzten Jahrzehnten parallel zu der Weiterentwicklung der technischen Möglichkeiten kontinuierlich zugenommen. Der Einsatz der IKT im Elektrizitätssystem

<sup>4</sup> BNetzA 2010a, S. 19.

<sup>5</sup> BDEW 2011b.

beschränkt sich jedoch auf innerbetriebliche und wenig kommunikative Insellösungen im Bereich der Messung und Regelung, wie dies bei EVUs und Netzbetreibern der Fall ist. Im Hinblick auf die Netzinfrastruktur konzentriert sich der Einsatz der IKT auf den Anteil des Übertragungsnetzes (2 Prozent des Gesamtnetzes), da es hier regelmäßig zu bidirektionalen Stromflüssen kommt, die einer Regelung und Überwachung bedürfen. Das Verteilnetz ist im Hinblick auf den Einsatz der IKT bis heute weitestgehend als ein blinder Fleck zu bewerten.

#### **Aktuelle Veränderungen im deutschen Elektrizitätssystem und ihre Auswirkungen**

Angestoßen durch sich verändernde energie- und umweltpolitische Rahmenbedingungen ist die kontinuierliche Anpassung des deutschen Elektrizitätssystems an neue technische Gegebenheiten und Anforderungen bereits seit einigen Jahren in vollem Gange. Seit dem Jahr 2000 fördert und garantiert das Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) als Nachfolger des Stromeinspeisegesetzes die vorrangige Nutzung regenerativ erzeugten Stroms und führt damit bis heute zu einem stetigen und substanziellen Umbau des Systems. Die verpflichtende Teilnahme der Energieindustrie am Handel mit Emissionszertifikaten sowie das Ziel der Bundesregierung zur Minderung von Treibhausgasemissionen, tragen zudem zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im Energiesystem bei. Mit dem im Sommer 2011 beschlossenen beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergienutzung in Deutschland bis zum Jahr 2022 wurde ein weiterer Treiber für eine fundamentale Veränderung des Energiesystems verankert, welcher dem Erreichen der energiepolitischen Vorgaben im Energieprogramm der Bundesregierung<sup>6</sup> weiteren Vortrieb leisten wird. Die Weichen für einen vermehrten Ausbau dezentraler Erzeugung auf der Basis erneuerbarer Energien sind damit gestellt.

Die energiepolitischen Ziele im Energiekonzept der Bundesregierung und der derzeit geltende Maßnahmenkatalog weisen den Weg von einer zentral dominierten zu einer dezentral dominierten und von einer konventionellen zu einer regenerativen Erzeugungsstruktur. Damit wird der Wechsel von einer kontinuierlichen hin zu einer fluktuierenden Erzeugungscharakteristik und von einem last- zu einem erzeugungsgeführten System bewirkt. Dies hat zur Folge, dass sich bekannte und sich stets wiederholende Erzeugungs- und Nutzungscharakteristika zugunsten sehr dynamischer und flexibler Muster mit zunehmendem Abstimmungsbedarf verändern. Das schwankende Stromangebot aus dezentraler Erzeugung, zum Beispiel aus Windparks und Photovoltaik (PV)-Anlagen, muss mit der ebenfalls schwankenden Nachfrage deckungsgleich zusammengeführt werden, um die Netzstabilität und die sehr hohe Versorgungssicherheit in Deutschland nicht zu gefährden. Die zunehmende Stromerzeugung im Verteilnetz führt dazu, dass lokal mehr Strom erzeugt als verbraucht wird, sich also der Lastfluss umgekehrt. Dies führt zu einer erhöhten Belastung der Netzinfrastruktur. Dadurch erhöht sich der Bedarf für die Messung, Regelung und Automatisierung des Stromflusses sowie für eine regional hochauflösende Überwachung und Steuerung im gesamten Netz.

Für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit stellen die skizzierten Entwicklungen sowohl eine große technische als auch eine enorme ökonomische Herausforderung dar. Die dafür notwendige, kontinuierliche technische Anpassung besteht derzeit aus dem Ausbau und der Ertüchtigung der Netzinfrastruktur, dem Zubau von Speicherkapazität und der Einführung eines IKT-basierten Einspeisemanagements.

Die derzeit in der Netzstudie II der Deutschen Energie-Agentur (dena) vorgestellten Netzausbaumaßnahmen verdeutlichen die Notwendigkeit, die große geografische Entfernung zwischen Erzeugungsschwerpunkten für Windenergie

<sup>6</sup> BUND 2011.

im Norden Deutschlands und den großen Verbrauchszentren im Süden zu überbrücken. Der Bedarf an Übertragungsleitungen wird bis 2015 auf rund 850 Kilometer und bis 2020 etwa 3 600 Kilometer geschätzt. Dabei konzentriert man sich vor allem auf die Höchstspannungsebene, also auf die 2 Prozent der Netzinfrastruktur, die für den Langstreckentransport zuständig sind.<sup>7</sup> Eine optimale Nutzung und Einbindung erneuerbarer Energien bedingt jedoch auch einen erhöhten Handlungsbedarf in nachgelagerten Netzebenen. Die Verschmelzung von IKT und Energietechnik kann dazu beitragen, dass der Ausbaubedarf verringert werden kann, indem die vorhandene Netzinfrastruktur intelligenter genutzt wird.

Zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage spielen Speichertechnologien eine wichtige Rolle. Hier eröffnet sich eine Vielzahl technischer Möglichkeiten, wie Batterien, Druckluftspeicher, Pumpspeicherkraftwerke und die Umwandlung von Strom in Wasserstoff und gegebenenfalls durch weitere Synthese zu Methan (Power to Gas). Derzeit sind diese Optionen jedoch entweder technisch noch nicht ausgereift (zum Beispiel adiabatische Druckluftspeicher), nicht oder nur wenig wirtschaftlich oder die Standortpotenziale (zum Beispiel Seen für Pumpspeicherkraftwerke) sind stark begrenzt. Eine Weiterentwicklung im Bereich der Speichertechnologien ist daher notwendig. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die oben genannten potenziellen Speicherlösungen zum einen auf verschiedenen Netzebenen einspeisen und zum anderen unterschiedlichen Systemdienstleistungen bzw. Versorgungsaufgaben dienen. Allesamt benötigen eine aufeinander abgestimmte Informationstechnik (IT)-Architektur und Kommunikationsprotokolle.

Der Bedarf für mehr IKT im Netz steigt mit dem wachsenden Mess- und Regelungsbedarf deutlich. Durch die Nutzung der IKT soll eine optimale Integration der dezentralen Erzeuger und die Abstimmung von Erzeugung und Verbrauch erreicht werden. Mit einem IKT-basierten Einspeisemanagement beginnen die VNB damit, auf die sich

verändernde Erzeugungsstruktur und -charakteristik und dementsprechend auch auf die technischen Anforderungen an die Netzinfrastruktur zu reagieren.

Parallel zu den technischen Veränderungen kommt es auch auf dem Energiemarkt zu neuen Entwicklungen. Durch die Vorrangstellung des Stroms aus erneuerbaren Energien kommt es vereinzelt zu Situationen, in denen im Gesamtsystem mehr Strom produziert als aktuell nachgefragt wird. In diesen Fällen müssen Speicherkapazitäten aufgefüllt oder Anlagen heruntergefahren bzw. ausgeschaltet werden, sofern dies für Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien gesetzlich erlaubt ist. An der Leipziger Strombörse kam es in jüngster Vergangenheit aufgrund von Überproduktion zeitweise sogar zu negativen Strompreisen: Der Erwerb von Strom ging mit einem Erlös einher. Auch wenn die Gründe für diese Extremereignisse sicherlich vielschichtig sind, so sind sie auch auf die aktuelle und sehr dynamische Veränderung des Energiesystems zurückzuführen, auf die sich der Markt noch nicht vollständig eingestellt hat. Einhergehend mit den technischen Veränderungen werden sich also auch die Marktstrukturen deutlich wandeln, Endverbraucher und Kleinsterzeuger werden vermehrt direkt am Marktgeschehen teilhaben.

Ergänzend zu den technischen Anpassungen werden auch die Prognoseinstrumente für fluktuierende Energiequellen verbessert, um die Planbarkeit ihres Einsatzes zu erhöhen. Die Genauigkeit der Vorhersagen für Dauer und Intensität von Wind und Sonnenschein trägt damit maßgeblich zu einer möglichst reibungslosen Integration der erneuerbaren Energien in das Energiesystem bei.

All die hier skizzierten technischen und nicht-technischen Lösungen tragen bereits heute zum besseren Verstehen des Gesamtsystems und der inhärenten Zusammenhänge im komplexen Energiesystem bei. Für die erfolgreiche Energiewende und die Implementierung nachhaltiger Lösungen ist dieses Verständnis jedoch noch deutlich weiterzuentwickeln.

<sup>7</sup> dena 2010a.

### Nutzung von IKT im Energiesystem – das „Internet der Energie“

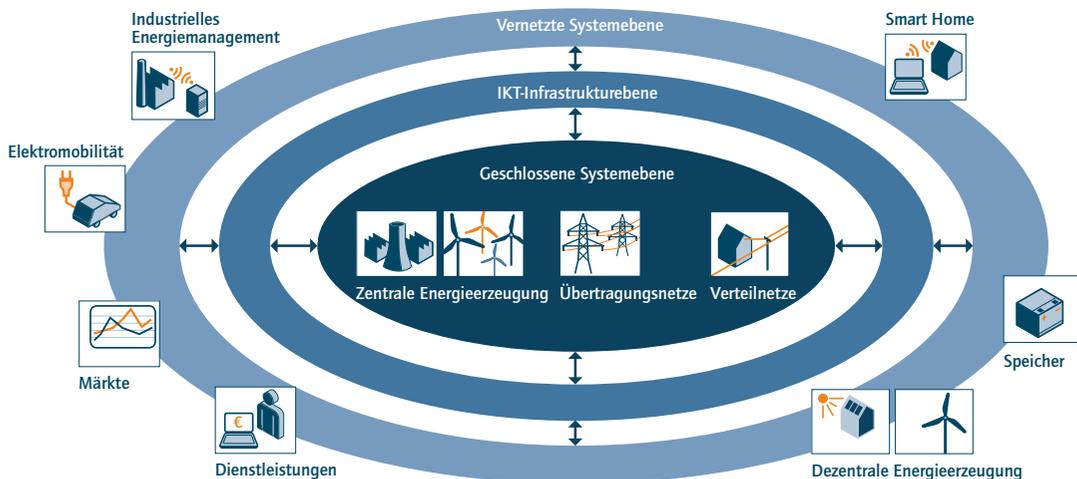
Die energietechnische Anpassung an die skizzierten Veränderungen und Herausforderungen betrifft sowohl die Konzeption und die Auslegung der Netzinfrastruktur als auch die Überwachung und Steuerung der Netze bzw. des Stromflusses. Der steigende Bedarf im Bereich der Messung, Regelung und Kommunikation zwischen den Systemkomponenten (Energieerzeugungs-, -verteilungs- und -nutzungstechnologien, Speicher, Markt- und Handelsplätze) kann durch deren Verschmelzung zu funktionellen und kommunikativen Einheiten erfolgreich gedeckt werden. Die IKT übernimmt damit eine wichtige Enabler-Funktion für die technische Umstrukturierung des deutschen Energiesystems. Die konvergente Entwicklung der IKT und Energietechnologie kann damit entscheidend zum Gelingen der Energiewende beitragen. Der Begriff „Internet der Energie“ beschreibt die neue Qualität der Anpassung und die Verbindung der beiden Technologiekomplexe sehr treffend.

Wie die Beispiele der zumeist innerbetrieblich genutzten und abgeschlossenen IKT-Konzepte zur Messung und Re-

gelung von Erzeugungsanlagen oder einzelnen Netzbestandteilen zeigen, nimmt die Integration von IKT in das Verteilnetz und die Kommunikation zwischen den Systemkomponenten bereits heute schrittweise zu. PV- und Windanlagen (> 100 kW) müssen im Notfall schon heute kurzfristig abgeschaltet werden können. Das bedeutet, sie müssen mit dem zuständigen VNB kommunizieren und von diesem fernzusteuern sein. Informationen aus intelligenten Stromzählern fließen bereits zum jetzigen Zeitpunkt von den Verbrauchern zu den jeweiligen Stromanbietern. Auch die Ortsnetzstationen werden zunehmend mit kommunikativen Funktionen ausgestattet. Immer mehr kommunikative Systemkomponenten werden in die Infrastruktur integriert. Erzeugern, Netzbetreibern, Stromanbietern und Verbrauchern muss eine größere Möglichkeit zur Kommunikation in Realzeit eröffnet werden.

In der Studie wird eine Systematik des Future Energy Grids (FEG) mit dem Fokus auf den verschiedenen Ebenen der IKT-Nutzungsoptionen verwendet (siehe Abbildung 2). Dabei wird die derzeit vorhandene IKT-Infrastruktur, wie sie bei EVUs oder Netzbetreibern als Insellösung – zumeist

Abbildung 2: Aufbau und Bestandteile des abstrakten und vereinfachten Systemmodells mit ausgewählten, grundlegenden Technologien, Funktionalitäten und Anwendungsbereichen.



innerbetrieblich oder unternehmensintern – im Einsatz ist (hier „geschlossene Systemebene“ genannt), um einen „Ring“ weiterer IKT, wie die intelligenten Haushaltsgeräte, Elektromobile oder die dezentralen Erzeugungseinheiten, erweitert und ergänzt (hier „vernetzte Systemebene“ genannt). Damit einhergehend wird die bidirektionale Kommunikation zwischen den verschiedenen Inseln und dem neuen IKT-Ring, der „IKT-Infrastrukturebene“, notwendig. Dem öffentlichen Kommunikationsnetz kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Wichtig wird zudem sein, welche Verbindungen zwischen den Komponenten dem freien und welche dem regulierten Markt unterworfen sein werden. Daneben spielen Fragen zur Informationssicherheit und Datenschutz eine große Rolle.

#### Prozessbeteiligte und Protagonisten auf dem Weg in das „Internet der Energie“

Die Energiewende und der Aufbau einer intelligenten Elektrizitätsinfrastruktur bedürfen des Zusammenspiels vieler Parteien. Erzeuger, Netzbetreiber, Verbraucher, Marktbeteiligte, Forschung und Entwicklung, Ausbildungsstätten für den handwerklichen und akademischen Nachwuchs und nicht zuletzt der Gesetzgeber müssen für nachhaltige Lösungen der energiepolitischen Frage- und Problemstellungen eng zusammenarbeiten.

Die Erzeugungsseite mit den großen EVUs, den Stadtwerken, den kommunalen Versorgern - aber auch mit vielen kleinen und privaten Erzeugern - muss die geforderten Anteile regenerativen Stroms bereitstellen. Das Erreichen dieser Ziele ist mit immensen Investitionen verbunden. Nicht zuletzt, da zum Ausgleich der fluktuierenden Erzeugung aus Wind und PV zusätzlich zu Speicherkapazitäten auch alternative Erzeugungskapazitäten, sogenannte Schattenkraftwerke, vorgehalten und betrieben werden müssen. Für den Netzausbau sowie für den Anschluss der Offshore-Windparks gibt die dena einen Investitionskostenbedarf von rund 1,0 bis 1,6 Milliarden Euro jährlich bis zum Jahr 2020 an.<sup>8</sup> Der Erneuerungsbedarf für das Verteilnetz in Europa ist mit Investitionen in Höhe von rund 400 Milliarden Euro in den Jahren 2010 bis 2014 verbunden. Betrachtet man die Investitionen in das Übertragungs- und Supranetz mit, dann erhöht sich das Investitionsvolumen bis ca. 2020 nach Schätzung der EU-Kommission auf 600 Milliarden Euro.<sup>9</sup>

Die Netzbetreiber müssen einerseits ihrer Verpflichtung zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität und Versorgungssicherheit nachkommen sowie andererseits die zunehmende vorrangige Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien realisieren und beherrschen. Zwei Verpflichtungen, deren Einhaltung derzeit nur mit einer weiteren Regelung, nämlich der Ausnahmeregelung für die Erlaubnis zur Abschaltung der fluktuierenden Erzeuger bei Gefährdung der Netzstabilität, gewährleistet werden kann. Wie bei den Erzeugern sind auch bei den Netzbetreibern sehr hohe Investitionen in die Bereiche Infrastruktur und Leittechnik nötig, die mit einer erheblichen ökonomischen Herausforderung einhergehen.

Den Erzeugern am Beginn der Wertschöpfungskette stehen die Verbraucher am Ende der Kette gegenüber. Im Gegensatz zum Bereich der Erzeugung und der Verteilung sind verbraucherseitig bisher nur geringe Veränderungen zu verzeichnen. Die Verbrauchscharakteristik ist im Vergleich zu den vergangenen Jahrzehnten beinahe unverändert. Der zeitliche Verlauf und die Höhe des Verbrauchs bzw. der Stromnachfrage in Haushalten und in der Industrie haben sich bisher nicht nennenswert verändert. Der tageszeitliche Verlauf des Stromverbrauchs in den Haushalten ist auch heute noch durch die drei Verbrauchsspitzen am Morgen, am Mittag und besonders am Abend charakterisiert. Die zu erwartenden Veränderungen werden die Verbraucher zukünftig öfter direkt betreffen, sei es über den weiteren Anstieg der Strompreise, die bei den genannten Investitionen in die Systeminfrastruktur unvermeidbar sind, sei es über das Angebot und die Nutzung neuer Services. Darüber

<sup>8</sup> dena 2010a, S. 13.

<sup>9</sup> Oettinger 2011; EKO 2010a.

hinaus sind die Verbraucher bzw. die Bevölkerung auch mit den Veränderungen durch Maßnahmen wie den vermehrten Leitungszubau oder durch den Wandel der Funktionalitäten von Technologien im Haushaltsbereich konfrontiert. Idealerweise sollte die Bevölkerung vorher informiert und – wenn möglich – an den Entscheidungs- und Planungsprozessen beteiligt werden. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geht hier seit Mitte des Jahres 2011 mit der Initiative „Bürgerdialog“ einen ersten Schritt in diese Richtung.<sup>10</sup> Letztendlich müssen die Verbraucher den Technologiewandel mittragen, damit dieser erfolgreich stattfinden kann.

Die derzeitige rahmengesetzgeberische Situation für den Markt und für die Erzeugung bzw. Verteilung von Strom ist in Deutschland vor dem Hintergrund der aktuellen Veränderungen ebenfalls anpassungsbedürftig. Der Gesetzgeber muss angesichts der jüngsten Entwicklung Verantwortlichkeiten und Pflichten überdenken oder neu definieren. Gesetzliche Vorgaben sind auch für den Datenschutz zu erarbeiten, der im Hinblick auf die zu erwartende zunehmende Datenübertragung immer dringlicher wird. Unstimmigkeiten zwischen den einzelnen Maßnahmen und Vorgaben müssen mit dem Ziel eines funktionierenden Marktes beseitigt werden.

Forschung und Entwicklung (FuE) können maßgebliche Impulse für die Weiterentwicklung der Technologien aber auch des Systemverständnisses geben und sind somit ein unverzichtbarer Bestandteil des Umbauprozesses.

Die Bildungspolitik und die Ausbildungsstätten sind verantwortlich dafür, dass der Arbeitsmarkt mit qualifiziertem handwerklichem, technischem und akademischem Nachwuchs versorgt wird. Konventionelle Ausbildungslinien müssen erweitert und neue Linien gegebenenfalls geschaffen werden.

### Das Future Energy Grid – ein perspektivischer Ausblick auf die Herausforderungen der Zukunft

Die ersten Schritte hin zu einem intelligenten Energiesystem werden bereits heute gegangen. Weiterführende notwendige Schritte sind abzusehen. Um auf die Veränderungen vorbereitet zu sein, ist ein perspektivischer und gleichzeitig konzeptioneller Blick in die Zukunft der Stromversorgung und damit auf das FEG unverzichtbar. Herausforderungen, vor denen die Politik, die Wirtschaft und die Wissenschaft bei der Entwicklung eines Smart Grids stehen, sind zum Beispiel:

- Entwicklung und Anpassung neuer Technologien
- Schaffung und Etablierung von IKT-Standards (zum Beispiel einheitliche Protokolle)
- Etablierung eines praktikablen Regulierungsrahmens zur Gewährleistung eines funktionierenden/funktionsfähigen Marktes
- Beibehaltung der sehr hohen Versorgungssicherheit
- Datenmanagement, Informationssicherheit
- Datenschutz
- Investitionen in Infrastruktur, Erzeugungs- und Speicheranlagen
- Kosten-Nutzen Analysen für bestimmte Technologien (zum Beispiel Smart Meter) im Vorfeld
- Beteiligung der Bevölkerung und Erhöhung der Akzeptanz für System- und Technologieveränderung
- Weiterentwicklung und Integration von Speichertechnologien
- Integration der Elektromobilität
- Erhöhung des Systemverständnisses (Zusammenwirken von Technologien und Akteuren)
- Bezahlbarkeit des Stroms
- Abstimmung der nationalen Entwicklungen mit dem europäischen Ausland

<sup>10</sup> BMBF 2011a.

Die aktuellen Veränderungen im Bereich der Stromerzeugung müssen bei allen Zukunftsbetrachtungen berücksichtigt werden. Die Nutzung der Windenergie wird weiter ausgebaut, wobei sich der Zubau mittelfristig auf Offshore-Anlagen konzentrieren soll. Auch die PV-Nutzung soll einen nennenswerten Ausbau erfahren. Die Bioenergiepotenziale sind dagegen eher moderat, wobei hier aufgrund der gegebenen Grundlastfähigkeit keine große Anpassung der Netzinfrastruktur notwendig wäre. Der regenerative Anteil am Bruttostromverbrauch soll nach den Zielen der aktuellen Bundesregierung von derzeit rund 17 Prozent<sup>11</sup> (Jahr 2010) auf 35 Prozent bis 2020, auf 50 Prozent bis 2030, auf 65 Prozent bis 2040 und schließlich auf 80 Prozent bis 2050 gesteigert werden.<sup>12</sup> Mittelfristig kommen regenerative Stromimporte aus Nordafrika<sup>13</sup> ins Blickfeld, die zur Erfüllung der Zielvorgaben beitragen. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geht beim langfristigen nachhaltigen Nutzungspotenzial erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung in Deutschland von rund 780 TWh/a aus<sup>14</sup>, wobei hier 280 TWh/a auf Offshore-Windenergie, 175 TWh/a auf Onshore-Windenergie, 150 TWh/a auf PV, 90 TWh/a auf Geothermie, 60 TWh/a auf Biomasse und 25 TWh/a auf Wasserkraft entfallen. Im Jahr 2010 lag der Bruttostromverbrauch in Deutschland bei rund 608 TWh,<sup>15</sup> das heißt bei gleichbleibendem Bruttostromverbrauch könnten erneuerbare Energien den gesamten Bedarf langfristig decken und Deutschland sich zu einem Nettoexporteur für regenerativen Strom entwickeln.

Der IKT-Einsatz in der geschlossenen Systemebene ist auf den oberen Spannungsebenen bereits auf einem hohen Stand. Dieser wird weiterhin auf diesem hohen Niveau weiterentwickelt. Die Kommunikation findet hauptsächlich zwischen den Übertragungsnetzbetreibern statt. Im Vergleich dazu kann angenommen werden, dass die Kommunikation im Verteilnetz mit den dezentralen Erzeugungseinheiten

über IKT-Schnittstellen deutlich breiter ausgerichtet sein wird.

Im Gegensatz zu den aktuellen Entwicklungen, die sich auf die Erzeugerseite konzentrieren, ist für die Zukunft zudem von einer deutlichen Veränderung des Konsumbereichs auszugehen. Verbraucherseitig werden vermehrt Elektromobile, Stromzähler und dezentrale Verbrauchsanlagen wie Wärmepumpen mit einer kommunikativen IKT-Schnittstelle in Betrieb gehen. Das Netz der Zukunft muss als Vermittler zwischen Verbraucher- und Erzeugerseite den neuen Rahmenbedingungen entsprechen. Auch für den zukünftigen Netzbetrieb ist von einem zunehmenden IKT-Einsatz auszugehen. So sollen beispielsweise vermehrt intelligente Ortsnetzstationen erbaut und für die Koordination bidirektionaler Lastflüsse ausgerüstet werden.

Das Stromsystem der Zukunft wird neben dem Zubau großer Trassen für die Langstreckenübertragung vor allem im Bereich des Verteilnetzes eine deutliche Veränderung erfahren. Für das FEG müssen „Verkehrsregeln“ für den bidirektionalen Stromverkehr im Nieder- und Mittelspannungsbereich aufgestellt werden. Diese Verkehrsregeln sind sowohl technisch als auch legislativ bzw. regulatorisch zu definieren.

Das Netz der Zukunft wird darüber hinaus durch eine Zunahme von Speicherkapazitäten gekennzeichnet sein. Gasnetze können als Speicher für Methan und zu Teilen auch für Wasserstoff dienen, die über die entsprechenden Technologien aus regenerativem Strom gewonnen und bei Bedarf wieder verstromt werden. Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland, aber auch im europäischen Ausland (zum Beispiel in Österreich oder Norwegen), werden als Speicher genutzt. Langfristig können auch die Batterien der Elektrofahrzeuge als mobile Speicher Anwendung finden.

<sup>11</sup> BMU 2011a, S. 16.

<sup>12</sup> BMWi 2010a, S. 5.

<sup>13</sup> Vgl. DESERTEC 2011a und 2011b.

<sup>14</sup> BMU 2011a, S. 53.

<sup>15</sup> Abgeleitet aus BMU 2011a, S. 16.

Neben den technischen Lösungen werden im Netz der Zukunft durch neue Vertriebs- und Geschäftsmodelle, die nur durch den vermehrten Einsatz der IKT überhaupt umsetzbar sind, zusätzlich Anreize zur Anpassung von Erzeugung und Verbrauch geschaffen. Demand Side Management (DSM), also das Management der Last und Anreizdesigns für Lastverschiebung, besonders bei industriellen Verbrauchern, wird einen wichtigen Beitrag leisten.

Diese Herausforderungen sind sowohl in der Energiewirtschaft als auch in der Politik gleichermaßen erkannt, Lösungsansätze und Konzepte werden von beiden Seiten mit Hochdruck erarbeitet und bereits testweise in Piloten erprobt. Ein Beispiel sind die sechs Modellregionen im Rahmen der E-Energy-Initiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.

Zum Teil besteht eine Alternative zwischen dem Einsatz der IKT, also der Investition in „Intelligenz“, und dem Ausbau der Primärtechnik inklusive der Kuppelstellen, Schaltanlagen, Transformatoren, etc. Grundsätzlich ist also der Ausbau der IKT-Infrastruktur dem Ausbau der elektrischen Versorgungsinfrastruktur durch „Kupfer und Eisen“ gegenüberzustellen. Es ist zu erwarten, dass für das Energiesystem der Zukunft in jedem Einzelfall sowohl das technische als auch das ökonomische Optimum in einem noch zu bestimmenden Mischungsverhältnis der beiden technischen Alternativen zu suchen ist. Denn: Bei all den Veränderungen und Anpassungsmaßnahmen muss der Strom bezahlbar bleiben, um für das Industrie- und Wirtschaftsland Deutschland keine Standortnachteile erwachsen zu lassen und den hohen Lebensstandard zu bewahren.

Vor dem Hintergrund dieser sehr facettenreichen Perspektive muss darauf hingewiesen werden, dass ungeachtet der sehr dynamischen Entwicklung der regenerativen Stromer-

zeugung aller Voraussicht nach mindestens in den nächsten zwei Jahrzehnten in Deutschland auch weiterhin die Stromerzeugung aus Braun- und Steinkohle und Erdgas sowie aus Atomkraft (bis 2022) das Rückgrat des Stromsystems bilden wird. Im Gegensatz zu den fluktuierend einspeisenden Erzeugern, wie PV-Anlagen und Windenergieanlagen, sind die kontinuierlich einspeisenden Stromerzeuger aus erneuerbaren Quellen und Energieträgern, zum Beispiel Biogasanlagen und Anlagen zur Nutzung fester Biomasse, mit deutlich geringeren technischen Herausforderungen verbunden. Die Wasserkraft leistet seit Jahrzehnten einen kontinuierlichen Beitrag zur Stromerzeugung. Die heute noch „exotischeren“ Arten der Stromerzeugung, zum Beispiel auf der Basis tiefer Geothermie, nehmen in Deutschland langsam zu, bewegen sich jedoch noch auf einem sehr geringen Niveau und werden erst seit wenigen Jahren statistisch erfasst.

### Fragestellungen und Ziele der Studie

Vor dem Hintergrund dieser zu erwartenden Entwicklungen ergeben sich für die Studie die folgenden IKT-bezogenen Fragestellungen im Hinblick auf eine sichere und zuverlässige sowie wirtschaftliche und nachhaltige Energieversorgung in Deutschland:

- Was sind die wesentlichen technologischen Schritte in das Future Energy Grid?
- Wie muss die Energiegesetzgebung gestaltet werden, um diesen Technologien möglichst marktbasierend eine Durchdringung zu ermöglichen?
- Wie hängen Akzeptanzfragen mit diesen Entwicklungen zusammen?
- Wo ist eine Orientierung an internationalen Entwicklungen sinnvoll?

Ziel der vorliegenden Studie ist die Beantwortung der oben genannten Fragen sowie die Schaffung eines analytisch

fundierten Diskussionsbeitrages zu diesen und angrenzenden Thematiken. Es soll untersucht und aufgezeigt werden, wie der Umbau des Energiesystems durch die Entwicklung und den zielgerichteten Einsatz der IKT unterstützt werden kann und welche Voraussetzungen (energie technisch, rahmenpolitisch, verbraucherseitig) geschaffen werden müssen, damit die IKT ihr großes Potenzial zur Realisierung des IdE ausschöpfen kann.

Insbesondere für die erste Frage ergibt sich eine Reihe von Schwierigkeiten:

- i. Ein Smart Grid hat keine fassbare Gestalt und ist kein Ziel in sich, sondern verbessert die technische und wirtschaftliche Effizienz in einem definierten Zielszenario.
- ii. Es gibt bisher kein allgemeines Verständnis, welche IKT-nahen Technologiefelder zu einem Smart Grid gehören und wie diese zu gliedern sind.
- iii. Ein Migrationspfad setzt sich aus vielen Einzelpfaden für die Technologiefelder zusammen. Die Technologiefelder sind auf vielfältige Weise voneinander abhängig.
- iv. Was lässt sich aus den komplexen Zusammenhängen schließen?

Für das Erreichen der Ziele wird eine mehrstufige methodische Vorgehensweise verfolgt, die im Folgenden kurz erläutert ist.

#### zu i. Ambivalenzen der Smart-Grid-Technologien

Um diese Herausforderung zu lösen, muss also der Raum der zukünftigen relevanten Möglichkeiten möglichst vollständig erfasst werden und zu jeder dieser Möglichkeiten der Migrationspfad erarbeitet werden. Dazu bedient man sich der Szenariotechnik. Dazu werden in einem ersten Schritt die maßgeblichen Schlüsselfaktoren erarbeitet, die für die Ausgestaltung des zukünftigen Smart Grids in Deutschland relevant sind. Für jeden dieser Schlüsselfaktoren werden die Ausprägungen definiert und beschrieben. Aus den wider-

spruchsfreien Kombinationen dieser Ausprägungen lassen sich dann Szenarien ermitteln, welche die mögliche Zukunft umreißen. Methodik, Vorgehen und Ergebnisse werden in Kapitel 2 beschrieben.

#### zu ii. Strukturierung, Auswahl, Beschreibung und Entwicklungsschritte der Technologiefelder

Als Grundlage der Strukturierung und Auswahl wurden zwei sich ergänzende Modelle gewählt und angepasst: das Systemebenenmodell, das von der EEGI<sup>16</sup> und vielen anderen Gruppen verwendet wird, und das Architekturmodell der IEC<sup>17</sup>. Alle IKT-nahen Technologien wurden dann in Technologiefelder einsortiert und beschrieben. Zwischen dem heutigen Stand und dem Entwicklungsstand, wie er in Visionspapieren beschrieben wird, wurden dann Entwicklungsschritte ermittelt (Kapitel 3).

#### zu iii. Abhängigkeiten der Entwicklung.

Im Prinzip sind mehrere Tausend Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Entwicklungsschritten der Technologiefelder analysierbar. Um diese Aufgabe auf das Notwendige zu beschränken, nämlich nur die Abhängigkeiten zu untersuchen, welche für eines der Szenarien relevant sind, wurde daher für jedes der drei Szenarien untersucht, welcher Entwicklungsschritt für das jeweilige Technologiefeld diesem Szenario zuzuordnen ist. Man erhält so eine „technologische Sicht“ der Szenarien (Abschnitt 3.5)

Für diese Sicht wurden dann die Abhängigkeiten ermittelt. (Abschnitt 4.2). An dieser Stelle hat man also bereits für jedes der Szenarien einen komplexen Migrationspfad. Was lässt nun sich daraus schließen? Dazu müssen die Beziehungsgeflechte analysiert werden.

#### zu iv. Analyse der komplexen Beziehungen

Um das komplexe Geflecht zu entwirren, sind zwei Fragestellungen hilfreich:

<sup>16</sup> EEGI 2010.

<sup>17</sup> IEC 2009.

- Benötigt ein Entwicklungsschritt eines Technologiefeldes besonders viele Voraussetzungen im gegebenen Szenario?
- Ist ein Entwicklungsschritt eines Technologiefeldes Voraussetzung für besonders viele weitere Entwicklungen im gegebenen Szenario?

Im ersten Fall ist zu untersuchen, ob diese eine zentrale Rolle für ein Szenario spielen. In diesem Fall ist auf ein Risikomanagement zu achten, da dieses Technologiefeld sehr anfällig für Störungen ist und dadurch die Entwicklung des Szenarios verzögern könnte. Ist umgekehrt ein Entwicklungsschritt eines Technologiefeldes Voraussetzung für besonders viele weitere Entwicklungen, ist dieses ein „Enabler“. Die Entwicklung dieses Technologiefeldes sollte also unbedingt mit großer Kraft vorangetrieben werden (siehe Abschnitt 4.3). Weiterhin ist zu analysieren, ob sich weitere Auffälligkeiten finden lassen, die eine Aussage zum Migrationspfad erlauben.

Da ein Szenario, nämlich das Szenario „Nachhaltig Wirtschaftlich“, besonders nah an den derzeitigen politischen

Zielsetzungen liegt, wird dieses noch genauer untersucht.

Zusammengefasst:

Vorgehen:

- Aufbau von Szenarien unter Nutzung von Schlüsselfaktoren, um die theoretischen Möglichkeiten der Zukunft umfassend abzubilden
- Ermittlung von Technologiefeldern des Smart Grids und Einordnung in die Systemebenen des Smart Grids  
Ermitteln der Entwicklungsschritte der Technologiefelder
- Ermitteln der jeweiligen Entwicklungsschritte, die für jedes der drei Szenarien erforderlich sind  
Ermitteln der Abhängigkeiten zwischen den Entwicklungsschritten
- Analyse des Beziehungsgeflechts pro Szenario

Zum besseren Überblick der Ablauf in einer Abbildung:

Abbildung 3: Aufbau und exemplarische Bestandteile des abstrakten und vereinfachten Systemmodells.

