

> Future Energy Grid

Migrationspfade ins Internet der Energie

Hans-Jürgen Apperath, 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

 **acatech**

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Herausgeber:

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath
Universität Oldenburg
Escherweg 2
26121 Oldenburg
E-Mail: 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

Dr. Christoph Mayer
OFFIS e. V.
Escherweg 2
26121 Oldenburg
E-Mail: 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
Internet: 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

> 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

3 ROLLE DER IKT IM FUTURE ENERGY GRID **90**

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

4	MIGRATIONSPFADE IN DAS FUTURE ENERGY GRID	158
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
5	INTERNATIONALER VERGLEICH	207
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
6 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EIN FUTURE ENERGY GRID	240
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
7 SMART GRID UNTER DEM GESICHTSPUNKT DER VERBRAUCHERAKZEPTANZ	257
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
8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	290
LITERATUR	294
ANHANG I: ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	311
ANHANG II: GLOSSAR	316

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 Kleinstzeuger 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