

Energieinformatik

Aktuelle und zukünftige Forschungsschwerpunkte

Die Energieinformatik ist ein junges und dynamisches Forschungsgebiet, dessen Relevanz durch die Energiewende stark zugenommen hat. Der Artikel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Energieinformatikforschung und zeigt Wege für zukünftige Forschungsarbeit in diesem Bereich auf. Der enthaltene Literaturüberblick orientiert sich an den zwei Hauptthemen der Energieinformatik: Intelligenten Energiesparsystemen und Smart Grids.

DOI 10.1007/s11576-013-0396-9

Die Autoren

Dr. Christoph Goebel (✉)
Prof. Dr. Hans-Arno Jacobsen
Victor del Razo, M.Sc.
Mag. (FH) Christoph Doblander
Dipl.-Ing. Jose Rivera
 Technische Universität München
 München
 Deutschland
christoph.goebel@tum.de

Dipl.-Inform. Wirt Jens Ilg
Dr. Christoph Flath
Prof. Dr. Hartmut Schmeck
Prof. Dr. Christof Weinhardt
Dipl.-Inform. Daniel Pathmaperuma
 Karlsruher Institut für Technologie
 Karlsruhe
 Deutschland

Prof. Dr.
Dr. h. c. Hans-Jürgen Appelrath
Prof. Dr. Michael Sonnenschein
Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff
Prof. Dr. Oliver Kramer
 Universität Oldenburg
 Oldenburg
 Deutschland
 und
 OFFIS
 Oldenburg
 Deutschland

Prof. Dr. Thorsten Staake
 Universität Bamberg
 Bamberg
 Deutschland

Prof. Dr. Elgar Fleisch
 ETH Zürich
 Zürich
 Schweiz
 und
 Universität St. Gallen
 St. Gallen
 Schweiz

Prof. Dr. Dirk Neumann
 Universität Freiburg
 Freiburg
 Deutschland

Prof. Dr. Jens Strüker
 Hochschule Fresenius
 Idstein
 Deutschland

Dr. Koray Ereğ
Prof. Dr. Rüdiger Zarnekow
 Technische Universität Berlin
 Berlin
 Deutschland

Dr. Holger Ziekow
 AGT International
 Darmstadt
 Deutschland

Prof. Dr. Jörg Lässig
 University of Applied Sciences
 Zittau/Görlitz
 Görlitz
 Deutschland

Eingegangen: 2013-03-01
 Angenommen: 2013-09-22
 Angenommen nach zwei Überarbeitungen durch die Herausgeber des Schwerpunktthemas.
 Online publiziert: 2013-12-21

This article is also available in English via <http://www.springerlink.com> and <http://www.bise-journal.org>:
 Goebel C et al. (2014) Energy Informatics. Current and Future Research Directions. Bus Inf Syst Eng. doi: 10.1007/s12599-013-0304-2.

© Springer Fachmedien Wiesbaden
 2013

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit preiswerter Energie aus fossilen Brennstoffen hat ein beeindruckendes Wohlstandswachstum in den Industrieländern ermöglicht. Die unveränderte Abhängigkeit unserer Gesellschaft von einer zuverlässigen Energieversorgung und damit auch die Abhängigkeit von politisch instabilen Regionen, die hohen Begleitkosten der Kohlendioxidemissionen und des Abbaus fossiler Brennstoffe sowie die Risiken der Atomkraft haben die Priorität von Energiethemen bei Regierungen, Unternehmen und Verbrauchern gleichermaßen gesteigert. So hat sich die Europäische Union das Ziel gesetzt, die Energieeffizienz und den Anteil der erneuerbaren Energien um 20 % zu erhöhen. Die deutsche Regierung will 35 % des Strombedarfs bis zum Jahr 2020 und 80 % bis 2050 mit erneuerbaren Energien decken. Andere Länder haben sich ähnliche Ziele gesetzt. Obgleich die jeweiligen Beweggründe verschiedener Regierungen, diese Ziele zu erreichen, und auch die eingesetzten politischen Instrumente variieren, werden die wirtschaftlichen Anreize zur Weiterentwicklung „grüner Technologien“, die dabei

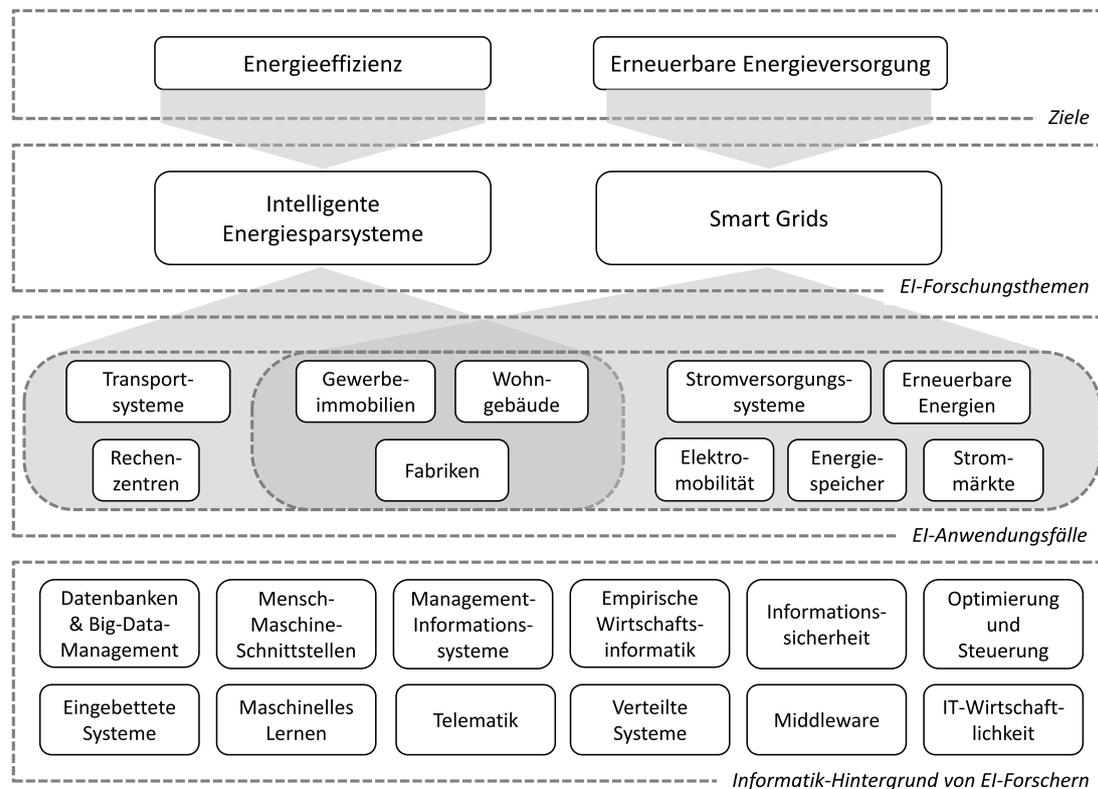


Abb. 1 Forschungsfelder der Energieinformatik

helfen, Energie einzusparen und nachhaltiger zu erzeugen, in den kommenden Jahren weiter steigen.

Immer mehr (Wirtschafts-)Informatiker entdecken nachhaltiges Energiemanagement als relevantes und wissenschaftlich vielversprechendes Forschungsfeld. Folglich hat die Energieinformatik (EI) seit kurzem viel wissenschaftliche Aufmerksamkeit (Watson et al. 2010) auf sich gezogen. Von der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) wird entscheidende Unterstützung bei der Umstellung auf nachhaltiges Wirtschaften erwartet, indem sie zwei Entwicklungen ermöglicht: (1) die Steigerung der Energieeffizienz über das aus Sicht des Ingenieurwesens Mögliche hinaus, und (2) die effiziente Integration von erneuerbaren Energiequellen durch intelligentere Stromversorgungssysteme. Die EI-Forschung stellt sich auf diese hoch priorisierten Ziele ein, indem sie sich auf klar definierte Herausforderungen für die Forschung fokussiert. Die Lösung jeder dieser Herausforderungen wird zur Entwicklung von IKT-basierten Systemen führen, die eine nachhaltige Energieversorgung ermöglichen. Allerdings kann EI-Forschung nur dann zu zufriedenstellenden Lösungen

führen, wenn bei deren Entwicklung wirtschaftliche Erwägungen mit einbezogen werden und die vorgeschlagenen Lösungen bestehende institutionelle Rahmenbedingungen, z. B. die Gestaltungsmöglichkeiten von Strommärkten, berücksichtigen.

Abbildung 1 zeigt die Bandbreite der EI-Forschung auf. Die beiden allgemeinen Ziele Energieeffizienz und erneuerbare Energieversorgung motivieren die Entwicklung von intelligenten Energiesparsystemen bzw. Smart Grids. Im Zusammenhang mit diesen übergeordneten EI-Forschungsthemen hat sich bereits eine Reihe von Anwendungsfällen ergeben, so etwa im Industrie- und Wohnbereich, beim Betrieb von Rechenzentren sowie der Elektromobilität. Einige dieser Anwendungsfälle sind nur aus dem Blickwinkel eines der beiden übergeordneten Forschungsthemen relevant, etwa Energiespeicher in Smart Grids, andere sind aus beiden Blickwinkeln interessant. In Gebäuden existieren z. B. üblicherweise sowohl Geräte mit unflexiblem als auch solche mit flexiblem Verbrauch, die denselben Endnutzern zur Verfügung stehen. Die Energieinformatik beschäftigt sich sowohl mit Energiesparsystemen als auch mit Smart Grids, da hier wichtige Syn-

ergien in Bezug auf den Aufbau entsprechender Sensor-Aktor- und Softwaresysteme vorliegen: die Fähigkeit, den Zustand physikalischer Systeme zu überwachen und diese steuerbar zu machen, sind entscheidende Anforderungen in beiden Bereichen. Zudem überschneiden sich die relevanten Anwendungsfälle und damit das notwendige Hintergrundwissen in vielen Fällen.

Der unterste Kasten in **Abb. 1** enthält eine Auswahl von Forschungsbereichen der (Wirtschafts-)Informatik, die einen Bezug zur Energieinformatik ausweisen. Auf vielen bereichsspezifischen Konferenzen sind in letzter Zeit Energieinformatik-Themen behandelt worden, hauptsächlich im Rahmen spezieller Konferenztracks und Workshops. Eigenständige internationale EI-Publikation sind die Konferenzen IEEE SmartGridComm, ACM e-Energy und IEEE PES ISGT sowie die Zeitschrift IEEE Transactions on Smart Grid. In den folgenden Abschnitten strukturieren wir die Forschungsaufgaben im Bereich intelligenter Energiesparsysteme und Smart Grids und besprechen ausgewählte Arbeiten über relevante EI-Anwendungsfälle.

Zusammenfassend definieren wir EI-Forschung über ihren Zusammenhang

mit den übergeordneten Forschungsthemen intelligente Energiesparsysteme und Smart Grids sowie durch die gemeinsamen Ziele Energieeffizienz und erneuerbare Energieversorgung. EI-Forscher tragen zur Entwicklung von energiesparenden Systemen und Smart Grids auf Basis ihres individuellen Hintergrundwissens bei. Ein Hauptgrund, warum sich die Energieinformatik derzeit zu einem eigenständigen interdisziplinären Forschungsgebiet weiterentwickelt, ist, dass bedeutsame Fortschritte nur erzielt werden können, wenn Wissenszusammenhänge innerhalb und zwischen verschiedenen Bereichen der Informatik ausgetauscht werden. Dies ermöglicht die Entwicklung gemeinsamer Problemformalisierungen, die Wiederverwendung von Softwarekomponenten, Analysewerkzeugen und empirischen Daten für die Evaluation.

2 Herausforderungen für die Forschung

2.1 Intelligente Energiesparsysteme

Die Energieeffizienz von Geräten wird in der Regel definiert als die durchschnittliche Menge an Arbeit, die sie mit einer bestimmten Menge an Energie verrichten können. Im Laufe der Jahre haben technische Fortschritte Geräte und Maschinen aller Art energieeffizienter gemacht und tun dies auch weiterhin. Allerdings umfasst diese herkömmliche Definition von Energieeffizienz nicht die Effizienzverbesserungspotenziale, die durch die Anpassung der Leistungen an die Anforderungen der Endbenutzer realisiert werden können: Das Ausschalten von Geräten bei Nichtbenutzung oder die Ausrichtung des Serviceniveaus an individuelle Nutzeranforderungen können zu erheblichen zusätzlichen Energieeinsparungen führen. Dieses zusätzliche Potenzial ist aus einer Reihe von Gründen, z. B. wegen schlechter Datenlage, hohen Steuerungskosten sowie einem Mangel an effektiven und attraktiven technischen Lösungen, bislang kaum realisiert.

Schlimmer noch, viele derzeit verwendete Kennzahlen berücksichtigen nicht einmal Energieeinsparungen, die sich aus dem Abschalten nicht genutzter Geräte ergeben, zum Beispiel die Power-Usage-Effectiveness-Metrik (PUE), die in Rechenzentren verwendet wird. Die Rolle der EI-Forschung wird daher im Schließen von Informationslücken und dem

Aufbau von Kontrollmechanismen bestehen, die den Energieverbrauch effektiv und effizient reduzieren.

Im Folgenden bezeichnen wir eine Situation, in dem der Energieverbrauch eines cyber-physikalischen Systems zum tatsächlichen Bedarf der Endbenutzer proportional ist, als *Leistungsproportionalität* (Lin et al. 2011). Wir möchten betonen, dass die Leistungsproportionalität nur einer von vielen Faktoren ist, welche die Gesamt-Energieeffizienz eines cyber-physikalischen Systems ausmachen.

IKT kann dazu beitragen, Leistungsproportionalität in cyber-physikalischen Systemen auf *drei Integrationsebenen* zu erreichen.

Auf der ersten Integrationsebene ermöglicht IKT Einzelpersonen und Unternehmen, ihren Energieverbrauch besser zu erfassen und zu verstehen und dementsprechend zu reagieren. Die Aufgaben für die EI-Forschung können in drei große Bereiche unterteilt werden: Entwicklung und Untersuchung von Systemen und Tools, die (1) energiebezogene Daten sammeln und speichern, (2) den Energieverbrauch einzelner Geräte Personen, Prozessen und Organisationseinheiten zuordnen und (3) diese Daten so präsentieren und im Kontext darstellen, dass Energieeinsparungen durch eigenständiges Handeln der Nutzer erleichtert werden. Diese Herausforderungen lassen sich auf anwendungsbezogene Forschungsaufgaben übertragen, z. B. auf die Entwicklung von Systemen zur Verarbeitung von Sensordaten, die optimale Gestaltung und Evaluation von Benutzerschnittstellen, die Entwicklung geeigneter Benchmarksysteme, die effiziente Informationsgewinnung und Konsolidierung von Daten aus heterogenen Quellen sowie auf die Gewinnung neuer Kenntnisse darüber, wie Personen und Unternehmen auf unterschiedliche Arten von Informationen über ihren Energieverbrauch reagieren.

Auf der zweiten Ebene ermöglicht es IKT jedem Einzelnen, aber auch ganzen Unternehmen, ihren Energieverbrauch über entsprechende Akteure besser zu steuern. Zum Beispiel können solche Systeme Gebäudenutzern weiterreichende Möglichkeiten zur individuellen und kollektiven Steuerung ihrer Haustechnik wie Heizung, Klimatisierung und Beleuchtung zur Verfügung stellen. Die Herausforderungen für die Forschung auf dieser Ebene umfassen die Entwicklung und Evaluation innovativer Steuerungsinfrastrukturen für unterschiedliche cyber-

physikalische Systeme. Dies ist keine einfache Aufgabe, da es normalerweise nicht möglich ist, Servicelevels für verschiedene Anwender vollkommen unabhängig voneinander zu erfüllen. Zum Beispiel können Temperatur und Beleuchtung eines Büros in der Regel nicht so gesteuert werden, dass die von jedem Arbeitnehmer wahrgenommenen Klima- und Beleuchtungsverhältnisse genau deren individuellen Wünschen entsprechen. Das gleiche gilt für Anwendungen, die zusammen mit den Anwendungen anderer Kunden auf derselben Hardware-Infrastruktur ausgeführt werden.

Auf der dritten Ebene wird der Energieregelleistungskreis durch innovative IKT-Systeme geschlossen, die in der Lage sind, den Energieverbrauch mit dem tatsächlichen Bedarf der Endanwender automatisch abzustimmen. Die Herausforderung für die EI-Forschung in diesem Bereich liegt im Entwurf von Systemen, die den tatsächlichen Endverbrauch erkennen und vorhersagen und die Leistungserbringung so steuern, dass der Stromverbrauch minimiert wird. Ein gutes Beispiel für ein solches System ist NEST, ein lernfähiges Thermostat (NEST 2012). Viele weitere Anwendungsbereiche sind denkbar, z. B. die intelligente Steuerung von Produktionsprozessen oder der Serverbetrieb in Rechenzentren (Lin et al. 2011). Der Entwurf solcher Systeme wird anspruchsvoller, je größer und komplexer die zu steuernden physikalischen Systeme werden. Während NEST für Haushalte mit nur wenigen Personen und einer einzelnen Klimaanlage konzipiert wurde, werden Gewerbeimmobilien oft von sehr vielen Personen genutzt und verfügen über komplexe Klimatechnik und Beleuchtungssysteme.

Innovative energiesparende Systeme können auf bestehenden IKT-Infrastrukturen aufsetzen. Beispielsweise können solche Systeme den Nutzern ermöglichen, mit ihren Smartphones auf bestehende Gebäudetechnik zuzugreifen. Bestehende Lösungen für die Lokalisierung innerhalb von Gebäuden könnten auf eine Art und Weise eingesetzt werden, dass individuelle Präferenzen nicht explizit, sondern automatisch und regelbasiert in Steuerbefehle übersetzt werden können. Moderne Gebäude besitzen in der Regel viele Akteure, auf die über standardisierte Gebäude-Bus-Protokolle wie etwa BAC-Net und KNX (Krioukov et al. 2011) zugegriffen werden kann. So könnten sich die Kosten für die Umsetzung der beschriebenen Systeme als deutlich niedriger als erwartet herausstellen.

Zu untersuchen, wie bestehende IKT-Infrastrukturen effizient integriert und erweitert werden können, stellt sich als eine weitere wichtige Herausforderung für die EI-Forschung heraus.

Die Entscheidung von Einzelpersonen und Organisationen, innovative energiesparende Systeme einzusetzen, sowie der langfristige Erfolg solcher Systeme hängen von individuellen Anreizen und psychologischen Lern- und Rückkopplungseffekten ab. Die Ermittlung von Nutzungsanreizen und Verhaltensdynamiken stellt eine anspruchsvolle Forschungsaufgabe dar. Zum Beispiel hängt die Entscheidung, ein intelligentes Thermostat zu erwerben und auch effektiv einzusetzen, möglicherweise sowohl von den erzielbaren Kosteneinsparungen als auch von anderen Faktoren wie Benutzerfreundlichkeit und sonstigem Mehrwert ab. Unternehmen wie Amazon und Google würden das Kosteneinsparpotenzial von derartigen Systemen mit den erwarteten finanziellen Auswirkungen auf Umsatz und Kundenzufriedenheit vergleichen. Somit kann erwartet werden, dass EI-Forschung mit einem Schwerpunkt auf betriebswirtschaftlichen und verhaltenswissenschaftlichen Fragestellungen eine wichtige Rolle in der Entwicklung von innovativen Energiesparsystemen spielen wird.

Um die Herausforderungen für die EI-Forschung im Zusammenhang mit Energiesparsystemen weiter zu konkretisieren, werden nachfolgend einige aus unserer Sicht relevante Forschungsfragen aufgeführt:

- Wie kann der Energieverbrauch von Rechenzentren durch intelligentere Überwachung und Steuerung verringert werden, ohne dass die Qualität der erbrachten Dienste sinkt?
- Welche mikroökonomischen Anreize und Hemmnisse bestehen in verschiedenen Anwendungsbereichen bezüglich des Ziels der Leistungsproportionalität?
- Wie kann der persönliche Energieverbrauch so kommuniziert werden, dass eine möglichst dauerhafte Wirkung erzielt wird?
- Wie können große Mengen an Sensordaten möglichst optimal gespeichert und vorgehalten werden, aus Sicht von Anwendungen sowohl zur Visualisierung als auch zur Steuerung?
- Wie kann man den Zugang zu Gebäudeleittechnik so standardisieren, dass auch Drittanbieter ohne Schwierigkeiten intelligente Energiesparanwendungen entwickeln können?

2.2 Smart Grids

Eine nachhaltige Energieversorgung kann nur durch den massiven Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung erreicht werden. Gemessen an der Erzeugungskapazität sind Wind- und Solarenergie die am schnellsten wachsenden erneuerbaren Energien. Dies führt zu großen Herausforderungen bei der Netzintegration, da die Leistungsabgabe von Windstromgeneratoren und Solaranlagen stark variiert, nicht steuerbar ist und diese geographisch über große Gebiete verteilt sind. Die langfristigen Ziele einer nachhaltigen Energieerzeugung können nur erreicht werden, wenn Verbraucher, die bisher direkt durch fossile Brennstoffe betrieben wurden, bei gleichzeitiger Einbeziehung erneuerbarer Energien elektrifiziert werden (McKay 2008). Diese Entwicklungen haben zu völlig neuen Anforderungen für die Überwachung und Steuerung von Stromnetzen geführt. Viele Experten stimmen darin überein, dass IKT eine führende Rolle bei der Integration erneuerbarer und neuer Arten der Stromerzeugung spielen wird, was zur Forderung nach Smart Grids geführt hat (Appelrath et al. 2012). Insbesondere erwartet man von IKT, das volle Potenzial flexibler Erzeugungen nutzbar zu machen und die effektive kurz- und langfristige Steuerung einer großen Zahl solcher Verbraucher zu ermöglichen (Callaway und Hiskens 2011).

EI-Forschung zu Smart Grids beschäftigt sich mit der Fragestellung, wie IKT dazu genutzt werden kann, Stromverbraucher steuerbar zu machen und Steuerungssysteme zu realisieren, die diese neuen Steuerungsmöglichkeiten von dezentralen Stromerzeugungsanlagen, flexiblen Lasten und Energiespeichersystemen ausnutzen, um die Integration von erneuerbaren Energiequellen in Stromversorgungssysteme zu erleichtern. Die Steuerbarkeit des Stromverbrauchs ist sowohl zur Realisierung von Smart Grids als auch von intelligenten energiesparenden Systemen essenziell: in beiden Fällen besteht ein wichtiges mittelfristiges Ziel darin, mittels IKT den Energieverbrauch messbarer und steuerbarer zu machen. Doch in der EI-Forschung im Bereich Smart Grids ist das langfristige Ziel, auf die schwankende Stromversorgung durch erneuerbare Energien durch die Verlagerung des Stromverbrauchs von Zeiten geringen Angebots auf Zeiten größeren Angebots zu reagieren, anstatt den Gesamtenergiebedarf

(einschließlich der nicht elektrisch übertragenen Energie) zu reduzieren. Somit sind hier bei der Steuerung der Nachfrage auch entsprechende Einschränkungen zu berücksichtigen. Diese Einschränkungen können sehr komplex sein, insbesondere dann, wenn IKT-Systeme die Steuerung der Nachfrage von Verbrauchern realisieren sollen, deren Hauptzweck ein anderer als die Unterstützung des Stromversorgungssystems ist.

Die Verwirklichung von Systemen, die zur Steuerung von Erzeugern und Verbrauchern in Smart Grids geeignet sind, baut auf Forschungsarbeit auf, die seit langem von Informatikforschern betrieben wird, nämlich der effizienten Koordination einer großen Zahl von unabhängig steuerbaren, mitunter autonomen, Systemkomponenten. Im heutigen liberalisierten Marktumfeld kann man von Stromerzeugern und -verbrauchern nicht erwarten, sich automatisch um das Gemeinwohl (ein stabiles, kostengünstiges, und nachhaltiges Stromversorgungssystem) zu bemühen, sondern man kann stattdessen annehmen, dass diese versuchen werden, ihren eigenen Nutzen zu maximieren (Ramchurn et al. 2012). Da Angebot und Nachfrage in den meisten heute betriebenen Stromnetzen bereits auf der Grundlage hochentwickelter Marktmechanismen koordiniert werden, können EI-Forscher mit Kenntnissen im Bereich der Analyse und Gestaltung von Märkten zur Entwicklung von Smart-Grid-Systemen beitragen, die sich problemlos in bestehende Marktstrukturen einpassen. Sie können auch dazu beitragen, innovative Marktstrukturen und Produkte zu entwickeln, die die speziellen Bedürfnisse dezentraler Erzeugung, flexibler Verbraucher und Energiespeicher berücksichtigen. Der Hauptgrund, warum die (Wirtschafts-)Informatik zur Anpassung der Strommärkte an die oben genannten Umwälzungen beitragen kann, ist, dass der Stromhandel die physikalischen Restriktionen des Stromnetzes berücksichtigen muss, was zu hochkomplexen Optimierungsproblemen führt. Die Anwendung von Marktmechanismen auf Smart Grids, in denen ein schwankendes Angebot und eine flexible Nachfrage auf Verteilungsebene abgestimmt werden müssen, verschärft die Komplexität der entsprechenden Kommunikations-, Optimierungs- und Steuerungsanforderungen.

Aus der Sicht der Informatik kann die IKT-Infrastruktur eines Smart Grid

als großes verteiltes System angesehen werden, da sie die Kommunikation und Koordination einer großen Zahl von verteilten Stromerzeugern und -verbrauchern ermöglichen muss. Die erheblichen Skalierbarkeits- und Sicherheitsanforderungen, die von der beschriebenen Anwendung gestellt werden, erfordern hochskalierbare und -verfügbare Lösungen für die Datenspeicherung, Datenverarbeitung und Kommunikation: Solche Anforderungen können sehr leicht die Fähigkeiten zentralistischer Kommunikations- und Optimierungsansätze übersteigen. Daher sind verteilte Systeme erforderlich, die die notwendigen Dienste für die Überwachung und Steuerung einer großen Zahl von verteilten Ressourcen bereitstellen, um ein Zuverlässigkeitsniveau in der Größenordnung des heutigen zentralisierten Stromversorgungssystems zu erreichen. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die praktische Realisierbarkeit verteilter Smart-Grid-Systeme ist die Interoperabilität ihrer Komponenten auf Basis internationaler Standards.

Um die aus Sicht der Energieinformatik relevanten Forschungsfragen im Bereich Smart Grids zu konkretisieren, haben wir nachfolgend wiederum eine kurze Liste zusammengestellt:

- Welche dezentralen Berechnungs- und Optimierungsverfahren sind auf die Steuerung von verteilten Ressourcen in Stromnetzen anwendbar und wie effektiv bzw. effizient arbeiten diese in realistischen Testfällen?
- Welche Methoden sind am besten für die Prognose der Stromproduktion aus erneuerbaren Energiequellen und die Nachfrage einzelner Lasten geeignet und wie gut können diese mit großen Datenvolumen und -frequenzen umgehen?
- Wie können verteilte Energieressourcen, z. B. kleine Energiespeicher und flexible Lasten, effizient in die existierenden Strommärkte integriert werden?
- Welcher Schaden würden durch einen Cyber-Angriff auf ein Smart Grid abhängig von der Anzahl an Energieressourcen, die ein Angreifer unter seine Kontrolle bringen kann, entstehen?
- Wie können wir die Verfügbarkeit von verteilten Systemen erhöhen, die den Datenaustausch zwischen Koordinatoren und Energieressourcen in Smart Grids ermöglichen?

3 Aktuelle Forschungsschwerpunkte

3.1 Intelligente Energiesparsysteme

Aktuelle Energieinformatik-Forschung mit dem Schwerpunkt intelligente energiesparende Systeme deckt bereits ein breites Spektrum relevanter Forschungsbereiche ab. Auf der ersten Ebene der IKT-Integration befasst sich eine Reihe von kürzlich erschienenen Publikationen mit der Aufgabe, große Mengen von energiebezogenen Daten zu sammeln, zu speichern und auszutauschen. sMAP ist beispielsweise ein RESTful Webservice, der es Messinstrumenten und anderen Quellen physikalischer Messdaten ermöglicht, diese Daten direkt zu veröffentlichen (Dawson-Haggerty et al. 2010). Ein weiteres sehr relevantes Thema, das der ersten IKT-Integrationsebene zuzuordnen ist und dem bisher große Aufmerksamkeit zuteilwurde, ist die Identifikation von Kleinstverbrauchern durch die Analyse aggregierter Messdaten (Weiss et al. 2012). Die Verfügbarkeit von effektiven Softwarelösungen für diesen Zweck würde die Erkennung des Gerätestatus sowie die Erfassung hochgranularer Verbrauchsdaten ermöglichen, ohne die Leistungsaufnahme der einzelnen Geräte separat zu messen. Umfangreiche Forschungsarbeit wurde auch auf dem Gebiet der Entwicklung und Evaluation von Technologien zur Visualisierung des Energieverbrauchs auf Endverbrauchersebene geleistet. Ein Beispiele hierfür ist die Arbeit von Weiss et al. (2010), die den Einsatz von Smartphones für die Energieverbrauchserfassung untersucht.

Im Hinblick auf das strategische Management von Informationssystemen auf Unternehmensebene haben EI-Forscher spezielle Green-IS-Strategien vorgeschlagen, welche die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens verbessern und die durch das Unternehmen verursachte Umweltbelastung verringern (Loeser et al. 2012). Um die Umsetzung von Green-IS-Strategien zu unterstützen, wurden weit verbreitete Managementtools, z. B. die Balanced Scorecard, durch die Integration von Energieeffizienz- und Umweltverträglichkeitsindikatoren (Grimm et al. 2012) an den Energiekontext angepasst. Ein weiterer Zweig der EI-Forschung hat damit begonnen, die Auswirkungen von intelligenten Energiespartechnologien auf das Verhalten von Endverbrauchern zu untersuchen und wie positive Effekte

durch das Systemdesign verstärkt werden können. Erste Forschungsergebnisse, beispielsweise zum Einfluss von normativem sozialem Feedback (Loock et al. 2011) und die Rolle von Zielvereinbarungen und Standards (Loock et al. 2013) sind verfügbar.

In mehreren aktuellen Forschungsarbeiten wurde damit begonnen, den Energieregellekreis zu schließen und mögliche Informatikbeiträge auf dem Gebiet der personalisierten automatischen Steuerung von cyber-physikalischen Systemen zu aufzuzeigen. Aufgrund ihres hohen Anteils am Gesamtenergieverbrauch stellen Gebäude hier einen thematischen Schwerpunkt dar. Die Arbeit von Krioukov et al. (2011) untersucht zum Beispiel die Verbindung von Webtechnologien und bestehenden Gebäudemanagementsystemen zur individuellen Beleuchtungssteuerung. Obwohl die Autoren kein vollautomatisches System vorschlagen, konnten sie allein durch die Bereitstellung einer individuellen Beleuchtungssteuerung große Energieeinsparungen erreichen. Ein weiteres Beispiel für innovative IKT-Systeme für das Gebäudeenergiemanagement ist in der Arbeit von Olken et al. (1998) beschrieben. Feldmeier und Paradiso (2010) untersuchen ebenfalls die individuelle Steuerung von Heizung, Lüftung und Klima (HLK). Sie evaluieren ein prototypisches System, das die Anwesenheit und das Wohlbefinden von Gebäudenutzern ermittelt und das HLK-System auf Basis dieser Messungen steuert. Sowohl Krioukov et al. (2011) als auch Feldmeier und Paradiso (2010) benutzen eine Living-Lab-Forschungsmethode. Die Arbeit von Aswani et al. (2011) untersucht eine Steuerungsmethode auf Basis modellgestützter Vorhersage zur Reduktion des Energieverbrauchs eines HLK-Systems. Ihr prototypisches System nutzt sMAP (Dawson-Haggerty et al. 2010) und ist somit ein gutes Beispiel dafür, wie verschiedene EI-Prototypen miteinander verbunden werden können und sollten, um einen umfassenderen Beleg für die Realisierbarkeit eines Systems zu liefern. Erste Arbeiten zu leistungsproportionalen Rechenzentren wurden zum Beispiel von Lin et al. (2011) und Krioukov et al. (2010) veröffentlicht. Diese Arbeiten beurteilen verschiedene Planungsalgorithmen für die Zuteilung von Rechenaufträgen, die das Ziel verfolgen, den Stromverbrauch von Serverfarmen zu reduzieren. Krioukov

et al. (2010) evaluieren ähnliche Algorithmen experimentell, während Lin et al. (2011) hierfür historische Lastzeitreihen verwenden. Hoyer (2011) schlagen eine Methode vor, mit der die Zuordnung von Rechenaufträgen zu Servern in Bezug auf den Energieverbrauch effizienter bewerkstelligt werden kann. Bodenstein et al. (2012) stellen einen energieparenden Planungsmechanismus für Rechenaufgaben basierend auf Standard-Optimierungsmethoden vor und zeigen, dass man den Energieverbrauch der verwendeten Server mit dessen Hilfe um 40 % reduzieren kann. Das Konzept leistungsproportionaler Datenverarbeitung geht weit über die Zeit- und Belegungsplanung von Servern hinaus. Die Entwicklung leistungsproportionaler Software ist spätestens seit der massenhaften Verbreitung von mobilen Rechnern und Endgeräten, bei deren Betrieb ein minimaler Energieverbrauch eine herausragende Rolle spielt, ein sehr aktiver Forschungsbereich der Informatik.

3.2 Smart Grids

Die Energieinformatik-Forschung im Bereich von Smart Grids hat sich bisher hauptsächlich auf die Rolle von IKT bei der Nachfragesteuerung (engl.: Demand Response oder DR) konzentriert, in der Regel mit einem Fokus auf bestimmte Lastarten (Strüker und van Dinther 2012). Da reale Testumgebungen für Smart Grids für die meisten EI-Forscher nicht zugänglich sind, setzen sie auf die Gewinnung neuer Erkenntnisse durch modellbasierte Forschungsmethoden. Im Vergleich zu anderen Forschungsfeldern der (Wirtschafts-) Informatik ist eine Vielzahl von für die Energieinformatik-Forschung relevanten Datenquellen öffentlich zugänglich, z. B. Daten über den Strombedarf, Marktpreise, die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien usw. So ist es möglich, Modelle zu parametrieren und innovative Methoden und Verfahren mithilfe echter Daten zu evaluieren (Feueriegel et al. 2012; Goebel 2012; Gottwalt et al. 2011).

Die Steuerung der Stromnachfrage ist ein zentrales Forschungsthema der Energieinformatik, da die flexiblen Lasten und Energiespeicher, deren Stromnachfrage oder -einspeisung gesteuert werden soll, räumlich verteilt sind sowie dynamische individuelle Beschränkungen aufweisen, die ihre Fähigkeit zur Lastverschiebung begrenzen. Darüber hinaus unterliegt die

Koordination dieser Ressourcen ebenfalls Beschränkungen, die durch die Sicherstellung eines zuverlässigen Netzbetriebs bedingt sind. Insbesondere darf die Nachfragesteuerung nicht zu einer Verminderung der Stromqualität oder dem Ausfall von Teilen der Netzinfrastruktur führen. Auch gut erforschte Optimierungsprobleme im Kontext von Stromversorgungssystemen, wie zum Beispiel das Problem der Bestimmung einer optimalen Kraftwerkseinsatzplanung oder die Bestimmung eines optimalen Lastflusses, erfordern einen erheblichen Rechenaufwand. Eine zentralisierte Optimierung der Steuerung von flexiblen Lasten und Energiespeichern könnte daher nicht in den hierfür zur Verfügung stehenden Zeiträumen durchführbar sein. Deshalb haben einige Energieinformatiker damit begonnen, verteilte Optimierungsverfahren auf die Steuerung von Ressourcen in Smart Grids anzuwenden. Beispiele finden sich bei Ma et al. (2013), Ahn et al. (2011) und Gan et al. (2007). Methoden der Selbstorganisation könnten ebenfalls dazu beitragen, verteilte Optimierungsprobleme in Smart Grids (Anders et al. 2012; Hinrichs et al. 2011) zu lösen.

Unabhängig davon, welche Koordinations- oder Optimierungsmethoden angewendet werden, ist die Fähigkeit zur Prognose wichtiger Eingangsgrößen für die Smart-Grid-Steuerung unerlässlich. Je nach Anwendung können wichtige Eingangsgrößen die Solarstromleistung, die Windstärke, die Stromnachfrage und – im Fall von flexiblen Lasten – auch Informationen sein, die auf deren primäre Verwendung schließen lassen (z. B. Fahrzeugbewegungs- und Gebäudenutzungsdaten). Daher erstreckt sich Energieinformatik-Forschung auch auf die Bereiche Prognose und Datamining. Zum Beispiel schlagen Kramer et al. (2013) ein System zur kurzfristigen Vorhersage der Windstromproduktion vor. Methoden des maschinellen Lernens, z. B. die Support-Vektor-Regression, haben sich bereits als erfolgreiche Verfahren für die Vorhersage hochdimensionaler Zeitreihen erwiesen; es sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig, um die Anforderungen an Verfahren des maschinellen Lernens im Kontext von Smart Grids zu beurteilen. Flath et al. (2012a, 2012b) verwenden Clusteringverfahren, um aus Smart-Metering-Daten von Privat- und kleinen Geschäftskunden homogene Verbrauchsgruppen abzuleiten.

Neben der Lösung von Optimierungsproblemen sind Energieinformatiker auch an der Entwicklung von Informationssystemen interessiert, die Daten von Millionen von physikalischen Ressourcen in Echtzeit verarbeiten können. Jacobsen und Muthusamy (2011) erwähnen eine Reihe von Anforderungen, die solche Systeme erfüllen sollten.

Wenn Smart Grids Wirklichkeit werden sollen, ist auch die Zuverlässigkeit und Sicherheit der zugrundeliegenden IKT-Infrastruktur von entscheidender Bedeutung. Wenn beispielsweise DR-Ressourcen Kraftwerke als Lieferanten von Regelleistung ablösen sollen, würde ihr Versagen im schlimmsten Fall zu Stromausfällen führen. Die Energieinformatik-Forschung hat sich bis heute dieses Themas nicht in dem erforderlichen Umfang angenommen. Die Arbeit von Khurana et al. (2010) bietet einige mögliche Ansatzpunkte hierfür. Strüker und Kerschbaum (2012) stellen einen Verschlüsselungsansatz zur Absicherung der Datenbanken von Intermediären vor, in denen große Mengen von Stromverbrauchsdaten gespeichert werden sollen. In bestimmten Fällen könnte der Datenschutz in derartigen Anwendungen auch mithilfe von speziellen Datamining-Methoden gewährleistet werden (Schlitter und Lässig 2012).

In letzter Zeit wurde das Potenzial von Elektrofahrzeugen (Plug-in Electric Vehicle, PEV) bei der Gewährleistung der Netzstabilität intensiv beforscht. Die in diesem Bereich veröffentlichten Arbeiten unterscheiden sich in Bezug auf den verwendeten Steuerungsansatz (direkt oder indirekt), die Modelle und verwendeten Daten, die Ziele und Restriktionen des Optimierungsproblems sowie die eingenommene Perspektive, zum Beispiel die des Netzbetreibers, des Stromversorgers oder die des PEV-Besitzers. Eine Reihe von neueren Arbeiten wie Goebel (2012), Flath et al. (2012a, 2012b) und Schuller et al. (2012) haben den wirtschaftlichen Wert des gesteuerten Ladens von Elektrofahrzeugen untersucht. Diese Beiträge vergleichen verschiedene Steuerungsstrategien in Bezug auf die erreichbaren Kosteneinsparungen. Eine andere Gruppe von Arbeiten konzentriert sich auf die Steuerung von Aufladevorgängen, wenn das Ziel darin besteht, das Stromnetz zu stabilisieren, zum Beispiel Goebel und Callaway (2013). Forschungsarbeiten über die tatsächliche Gestaltung der IKT-Infrastrukturen, die gesteuertes Laden ermöglichen, sowie die damit verbundenen Integrationsaspekte existieren

bislang nur vereinzelt. Als Beispiel seien Mültin et al. (2012) erwähnt, die eine prototypische Lösung für die integrierte Steuerung einer PEV-Aufladestation und eines Smart Home beschreiben.

Ein weiterer Anwendungsfall, dem sich die Energieinformatikforschung zugewendet hat, ist die verteilte Steuerung von Lasten mit thermischem Energiespeicher. Diese Lasten können Energie in Form von Wärme oder Kälte speichern und elektrisch betrieben werden. Daher kann der Leistungsbedarf von Lasten wie HLK-Systemen, Warmwasserbereitern und Kühlschränken innerhalb gewisser Schranken gesteuert werden. Die Arbeit von Stadler et al. (2009) beschäftigt sich mit Verfahren zur Steuerung von Lastverschiebungen bei Kühlschränken, ergänzt von Hinrichs et al. (2009) durch Verfahren zur De-Synchronisation des Strombedarfs von Geräten, die auf das gleiche Steuerungssignal reagiert haben. Oldewurtel et al. (2011) wenden Methoden der modellgestützten Regelung auf HLK an, um deren Verbrauch auf variable Strompreise abzustimmen. Die Arbeit von Mathieu und Callaway (2012) ist besonders im Hinblick auf IKT-Anforderungen interessant, da sie Fälle untersucht, bei denen Zustandsinformationen nicht in Echtzeit zur Verfügung stehen.

4 Zukünftige Forschungsschwerpunkte und Anforderungen

Wie der vorige Abschnitt zeigt, gliedert sich die derzeitige Energieinformatik-Forschung in mehrere miteinander in Beziehung stehende Stränge. Ein Großteil dieser Forschung setzt den Schwerpunkt auf das Potenzial der IKT bei der Realisierung von intelligenten Energiesparsystemen und Smart Grids. Beispielsweise wird untersucht, wie Elektrofahrzeuge zu einer effizienteren Integration variabler erneuerbarer Energiequellen beitragen können, oder es werden konkrete technologische oder organisatorische Lösungen vorgeschlagen, etwa innovative Optimierungs- und Steuerungsmethoden. Diese Form der Energieinformatik-Forschung wird sicherlich auch in der Zukunft fortgesetzt werden, da viele relevante Forschungsfragen bislang noch nicht zufriedenstellend beantwortet werden konnten.

Zukünftig erwarten wir mehr EI-Forschung in zwei wesentlichen Bereichen: (1) der expliziten Quantifizierung

des Trade-offs zwischen IKT-Einsatz und den hierdurch erreichbaren wirtschaftlichen und ökologischen Vorteilen sowie (2) die Entwicklung von umfassenderen IKT-Lösungen und deren Evaluation auf der Basis von realistischen Simulationen cyber-physikalischer Systeme.

Während sich EI-Forscher mehr und mehr Hintergrundwissen zu relevanten Themen aneignen, beispielsweise zu thermischen Gebäudemodellen und dem Betrieb von Stromnetzen, werden sie das aktuelle Spektrum von Anwendungsfällen schrittweise erweitern. Letztendlich wird es möglich sein, innovative Systemkomponenten durch Co-Simulation von IKT und physikalischer Infrastruktur zu evaluieren. Wir sagen daher voraus, dass die zukünftige Energieinformatik-Forschung relevante Fragestellungen integrativer und umfassender angehen wird, was eine in hohem Maße interdisziplinäre Herangehensweise voraussetzt.

Bezüglich (1) wird die Untersuchung wirtschaftlicher und ökologischer Trade-offs ein zentrales Thema der zukünftigen EI-Forschung sein: Intelligente IKT-basierte Steuerung konkurriert mit der Vorhaltung von mehr physikalischer Kapazität. Die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Smart Grids kann wiederum nicht ohne Kenntnis der wirtschaftlichen Aspekte von Stromversorgungssystemen und -märkten erfolgen. EI-Forscher, die sich auf diesen Bereich konzentrieren wollen, sollten daher solide energiewirtschaftliche Kenntnisse besitzen. Sie sollten beispielsweise mit der aktuellen Strommarktstruktur vertraut und in der Lage sein, die Betriebskosten von Gebäuden und Energiesystemen zu beurteilen.

Bezüglich (2) sollten EI-Forscher, die an der Gestaltung von IKT-Systemen zur Überwachung und Steuerung der Stromnachfrage mitwirken wollen, mit den zugrundeliegenden technischen Anlagen und Geräten sowie dem Verhalten der Personen und Unternehmen, die diese Geräte nutzen, vertraut sein. Daher sollten sie entweder in der Lage sein, ihre Lösungsvorschläge in entsprechenden Testumgebungen zu evaluieren, zum Beispiel, indem sie einen Living-Labs-Forschungsansatz wählen, oder sie sollten moderne Simulationsmethoden und echte Daten nutzen, um ihre Prototypen zu evaluieren. Dies setzt auch eine engere Zusammenarbeit mit Ingenieurswissenschaftlern aus der Elektrotechnik,

dem Maschinenbau, und dem Bauingenieurwesen voraus. Die simulationsgestützte Evaluation erfordert zudem umfangreiche Rechenressourcen, da sowohl die physischen Komponenten des cyber-physikalischen Systems als auch der eigentliche IKT-Prototyp simuliert werden müssen.

Literatur

- Appelrath H-J, Kagermann H, Mayer C (Hrsg) (2012) Future Energy Grid – Migrationspfade ins Internet der Energie. Springer, Heidelberg
- Ahn C, Li C-T, Peng H (2011) Optimal decentralized charging control algorithm for electrified vehicles connected to smart grid. *Journal of Power Sources* 196(23):10369–10379
- Anders G, Hinrichs C, Siefert F, Behrmann P, Reif W, Sonnenschein M (2012) On the influence of inter-agent variation on multi-agent algorithms solving a dynamic task allocation problem under uncertainty. In: Proc of 6th IEEE international conference on self-adaptive and self-organizing systems (SASO), Lyon
- Aswani A, Master N, Taneja J, Culler D, Tomlin C (2011) Reducing transient and steady state electricity consumption in HVAC using learning-based model predictive control. *Proceedings of the IEEE* 100(1):240–253
- Bodenstein C, Schryen G, Neumann D (2012) Energy-aware workload management models for operating cost reduction in data centers. *European Journal of Operational Research* 222(1):157–167
- Callaway DS, Hiskens IA (2011) Achieving controllability of electric loads. *Proceedings of the IEEE* 99(1):184–199
- Dawson-Haggerty S, Jiang X, Tolle G, Ortiz J, Culler D (2010) SMAP – a simple measurement and actuation profile for physical information. In: Proc of 8th ACM conference on embedded networked sensor systems (SenSys), Zurich
- Feldmeier M, Paradiso JA (2010) Personalized HVAC control system. In: Proc of internet of things (IoT) 2010, Tokyo
- Feuerriegel S, Strüker J, Neumann D (2012) Reducing price uncertainty through demand side management. In: Proc of international conference on information systems (ICIS), Orlando
- Flath CM, Gottwalt S, Ilg JP (2012a) A revenue management approach for efficient electric vehicle charging. In: Proc of 45th Hawaii international conference on system sciences, Hawaii
- Flath CM, Nicolay D, Conte T, van Dinther C, Filipova-Neumann L (2012b) Cluster analysis of smart metering data. *Business Information Systems Engineering* 4(1):31–39
- Gan L, Topcu U, Low S (2007) Optimal decentralized protocols for electric vehicle charging. *IEEE Transactions on Power Systems* 6(1):1–10
- Goebel C (2012) On the business value of ICT-controlled plug-in electric vehicle charging in California. *Energy Policy* 53:1–10
- Goebel C, Callaway DS (2013) Using ICT-controlled plug-in electric vehicles to supply grid regulation in California at different renewable integration levels. *IEEE Transactions on Smart Grid* 4(2):729–740

Zusammenfassung / Abstract

Christoph Goebel, Hans-Arno Jacobsen, Victor del Razo, Christoph Doblander, Jose Rivera, Jens Ilg, Christoph Flath, Hartmut Schmeck, Christof Weinhardt, Daniel Pathmaperuma, Hans-Jürgen Appelrath, Michael Sonnenschein, Sebastian Lehnhoff, Oliver Kramer, Thorsten Staake, Elgar Fleisch, Dirk Neumann, Jens Strüker, Koray Ereik, Rüdiger Zarnekow, Holger Ziekow, Jörg Lässig

Energieinformatik

Aktuelle und zukünftige Forschungsschwerpunkte

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung einer nachhaltigen Energieerzeugung und eines sparsameren Verbrauchs hat sich die Energieinformatik (EI) zu einem florierenden Forschungsgebiet innerhalb der (Wirtschafts-)Informatik entwickelt. Der Beitrag versucht, dieses neue und dynamische Forschungsfeld durch die Beschreibung aktueller Themen und Methoden der Energieinformatikforschung zu charakterisieren, und gibt einen Ausblick auf die mögliche zukünftige Entwicklung. Zwei generelle Forschungsfragen haben bislang die meiste Aufmerksamkeit auf sich gezogen und werden die EI-Forschungsagenda wahrscheinlich auch in den nächsten Jahre dominieren: Wie kann Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) dabei helfen, (1) die Energieeffizienz zu erhöhen und (2) dezentrale erneuerbare Energiequellen in das Stromnetz zu integrieren. Die Autoren stellen ausgewählte Forschungsarbeiten aus dem EI-Bereich vor und zeigen, wie diese Forschungsfragen in konkrete Forschungsprojekte münden und wie EI-Forscher Beiträge auf der Grundlage ihres jeweiligen akademischen Hintergrundes erbracht haben.

Schlüsselwörter: Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Energieproportionalität, cyber-physikalische Systeme, intelligente energiesparende Systeme, Smart Grids, Energieinformatik

Energy Informatics

Current and Future Research Directions

Due to the increasing importance of producing and consuming energy more sustainably, Energy Informatics (EI) has evolved into a thriving research area within the CS/IS community. The article attempts to characterize this young and highly dynamic field of research by describing current EI research topics and methods and provides an outlook of how the field might evolve in the future. It is shown that two general research questions have received the most attention so far and are likely to dominate the EI research agenda in the coming years: How to leverage information and communication technology (ICT) to (1) improve energy efficiency, and (2) to integrate decentralized renewable energy sources into the power grid. Selected EI streams are reviewed, highlighting how the respective research questions are broken down into specific research projects and how EI researchers have made contributions based on their individual academic background.

Keywords: Renewable energy, Energy efficiency, Power-proportionality, Cyber-physical systems, Smart energy-saving systems, Smart grids, Energy informatics

- Gottwalt S, Ketter W, Block C, Collins J, Weinhardt C (2011) Demand side management – a simulation of household behavior under variable prices. *Energy Policy* 39(12):8163–8174
- Grimm D, Loeser F, Ereik K, Zarnekow R (2012) Evaluation von Performance Measurement Systemen zur Konzeption eines geschäftsprozessorientierten Management-Cockpits für IKT-Energieeffizienz. In: *Informatik 2012 – Workshop Informatik und Nachhaltigkeitsmanagement*, Braunschweig
- Hinrichs C, Vogel U, Sonnenschein M (2009) Modelling and evaluation of desynchronization strategies for controllable cooling devices. In: *Proc of 6th Vienna international conference on mathematical modelling*, Vienna
- Hinrichs C, Vogel U, Sonnenschein M (2011) Approaching decentralized demand side management via self-organizing agents. In: *Proc of 10th international conference on autonomous agents and multiagent systems (AAMAS)* Taipei
- Hoyer M (2011) Resource management in virtualized data centers regarding performance and energy aspects. PhD thesis, University of Oldenburg
- Jacobsen H-A, Muthusamy V (2011) Green middleware. In: *Green IT: technologies and applications*. Springer, Berlin, S 341–361
- Khurana H, Hadley M, Lu N, Frincke DA (2010) Smart-grid security issues. *IEEE Security and Privacy* 8(1):81–85
- Kramer O, Gieseke F, Satzger B (2013) Wind energy prediction and monitoring with neural computation. *Journal Neurocomputing* 109:84–93
- Krioukov A, Mohan P, Alspaugh S, Keys L, Culler D, Katz R (2010) NapSAC: design and implementation of a power-proportional web cluster. In: *Proc of 1st ACM SIGCOMM workshop on green networking*, New Delhi
- Krioukov A, Dawson-Haggerty S, Lee L, Culler D (2011) A living laboratory study in personalized automated lighting controls. In: *Proc of 3rd ACM workshop on embedded sensing systems for energy-efficiency in buildings (BuiSys)*, Seattle
- Lin M, Wierman A, Andrew LLH, Thereska E (2011) Dynamic right-sizing for power-proportional data centers. In: *Proc of 30th IEEE international conference on computer communications (INFOCOM)*, Shanghai
- Loeser F, Ereik K, Zarnekow R (2012) Towards a typology of green IS strategies: insights from case study research. In: *Proc of 32nd international conference on information systems*, Orlando
- Loock C-M, Staake T, Landwehr J (2011) Green IS design and energy conservation: an empirical investigation of social normative feedback. In: *Proc of 31st international conference on information systems (ICIS)*, Shanghai
- Loock C, Staake T, Thiesse F (2013) Motivating energy-efficient behavior with green IS: an investigation of goal setting and the role of defaults. *MIS Quarterly* 37(4):1313–1332
- Ma Z, Callaway DS, Hiskens IA (2013) Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 21(1):67–78
- Mathieu JL, Callaway DS (2012) State estimation and control of heterogeneous thermostatically controlled loads for load following. In: *Proc of 45th Hawaii international conference on system science (HICSS)*, Hawaii

- McKay D (2008) Sustainable energy without the hot air. UIT, Cambridge
- Mültin M, Allerding F, Schmeck H (2012) Integration of electric vehicles in smart homes – an ICT-based solution for V2G scenarios. In: Proc of 2012 IEEE PES innovative smart grid technologies conference, Washington, DC
- NEST (2012) In: NEST – the learning thermostat. <http://www.nest.com/>. Abruf am 2012-01
- Oldewurtel F, Ulbig A, Morari M, Andersson G (2011) Building control and storage management with dynamic tariffs for shaping demand response. In: IEEE PES conference on innovative smart grid technologies (ISGT) Europe, Manchester
- Olken F, Jacobsen H-A, McParland C, Piette MA, Anderson MF (1998) Object lessons learned from a distributed system for building monitoring and operation. In: Proc of object oriented programming systems languages and applications (OOPSLA), Vancouver
- Ramchurn SD, Vytelingum P, Rogers A, Jennings NR (2012) Putting the 'smarts' into the smart grid: a grand challenge for artificial intelligence. *Communications of the ACM* 55(4):86–97
- Schlitter N, Lässig J (2012) Distributed privacy preserving classification based on local cluster identifiers. In: Proc of 11th IEEE international conference on trust, security and privacy in computing and communications, Liverpool
- Schuller A, Ilg J, van Dinther C (2012) Benchmarking electric vehicle charging control strategies. In: Proc of 2012 IEEE PES innovative smart grid technologies (ISGT), Washington, DC
- Stadler M, Krause W, Sonnenschein M, Vogel U (2009) Modelling and evaluation of control schemes for enhancing load shift of electricity demand for cooling devices. *Environmental Modelling and Software* 24(2):285–295
- Strüker J, Kerschbaum F (2012) From a barrier to a bridge: data-privacy in deregulated smart grids. In: Proc of 32nd international conference on information systems (ICIS), Orlando
- Strüker J, van Dinther C (2012) Demand response in smart grids: research opportunities for the IS discipline. In: Proc of 18th Americas conference on information systems (AMCIS), Seattle
- Watson RT, Boudreau M-C, Chen AJ (2010) Information systems and environmentally sustainable development: energy informatics and new directions for the IS community. *MIS Quarterly* 34(1):23–38
- Weiss M, Loock C-M, Staake T, Mattern F, Fleisch E (2010) Evaluating mobile phones as energy consumption feedback devices. In: Proc of 7th international ICST conference on mobile and ubiquitous systems, Sydney
- Weiss M, Staake T, Mattern F (2012) Leveraging smart meter data to recognize home appliances. In: Proc of IEEE pervasive computing and communication (PerCom), Lugano