

Smart Energy: Rückblick und Ausblick

Peter K. Brandt

Departement für Informatik, ETH Zürich

brandt@ergon.ch

Zusammenfassung

Zur Lösung der sich abzeichnenden Knappheit in der Energieversorgung der Zukunft lassen sich insbesondere im Bereich der Versorgung mit elektrischer Energie durch Informatikunterstützung wesentliche Fortschritte erzielen. Dieser Beitrag führt kurz in die Ideen hinter den Konzepten „Smart Energy“ und „Smart Grid“ ein und beschreibt danach, wie sich bereits erforschte Lösungsbausteine kombinieren lassen, um konkrete Anforderungen zu erfüllen und mehrere wichtige Ziele auf dem Weg zum Stromnetz der Zukunft zu erreichen.

Eine Diskussion verschiedener nichtfunktionaler Anforderungen zeigt anschliessend auf, welche Fragestellungen neben den rein funktionalen Aspekten für ein praxistaugliches Gesamtsystem von zentraler Bedeutung sind. Schliesslich werden die Chancen für eine erfolgreiche Praxisanwendung der vorgestellten Ideen beurteilt und derzeit noch offene Fragen identifiziert, deren Beantwortung auf dem Weg zu einer realen Umsetzung noch zu erfolgen hat.

1 Einführung

Vor dem Hintergrund einer weltweit ungebremst zunehmenden Nachfrage nach Energie, knapper werdender natürlicher Ressourcen (insbesondere fossiler Energieträger) und nachweisbarer Klimaveränderungen sind neue Ansätze zur effizienten und umwelt- und klimaschonenden Nutzung von Energiequellen heute wichtiger denn je.

Ein grosser Teil der weltweit verbrauchten Energie stammt aus der Verbrennung fossiler Energieträger wie Erdöl, Erdgas und Kohle. Diese Energieträger sind nicht unbegrenzt verfügbar und werden in den kommenden Jahren weiter knapp werden. Gleichzeitig wird bei Ihrer Verbrennung CO₂ freigesetzt, was eine weltweite Klimaveränderung mit negativen Folgen bewirkt. Aus diesen Gründen ist es anzustreben, dass alle Mitglieder der Gesellschaft und alle Staaten Wege suchen, mit deren Hilfe Energie auf nachhaltigere Weise bereitgestellt und effizienter transportiert und eingesetzt werden kann.

Unter den verschiedenen Formen von Energie spielt insbesondere die *elektrische Energie* in industrialisierten Nationen eine zentrale Rolle: Einerseits hat elektrische Energie einen grossen Anteil am gesamten Energieverbrauch vieler Länder. Im Fall der Schweiz waren dies beispielsweise im Jahr 2008 rund 24% [12]. Andererseits besteht in sehr vielen Bereichen eine Abhängigkeit von zuverlässiger Versorgung mit elektrischer Energie, weshalb das Stromnetz als eine der kritischen Infrastrukturen angesehen wird¹. Ausfälle der Stromversorgung können signifikante Folgen in Bereichen wie Transport und Verkehr, Informationstechnik und Telekommunikation oder der Wasserversorgung haben. Ein länger dauernder Stromausfall würde beispielsweise in der Schweiz den Bahnverkehr, der fast ausschliesslich mit elektrischer Energie betrieben wird, zum Erliegen bringen, ein Ereignis, wie es z.B. in den frühen Abendstunden des 22. Juni 2005 für rund viereinhalb Stunden eintrat [23]. In der Folge kommen Pendler nicht an ihre Arbeitsplätze oder nach Hause, werden Produktionsanlagen nicht mit Ausgangsmaterial versorgt und verderbliche Güter werden zerstört. Kurze Stromausfälle können in manchen Bereichen wie Rechenzentren oder Kommunikationsinfrastruktur noch durch Massnahmen wie unterbrechungsfreie Stromversorgungen und Notstromgeneratoren überbrückt werden. Längere Ausfälle oder grosse Stromverbraucher lassen sich jedoch so nicht abfangen.

Viele der genannten Bereiche, die von einer zuverlässigen Stromversorgung abhängig sind, sind wiederum Grundlage für andere kritische Infrastrukturen. Somit ist offensichtlich, dass moderne Industrie- gesellschaften auf eine robuste Infrastruktur zur Versorgung mit elektrischer Energie angewiesen sind.

Wie im folgenden gezeigt wird, sind heute Informations- und Kommunikationstechnologien reif genug, um bei einer Transformation des traditionellen Stromnetzes zum Einsatz zu kommen, die zu besserer Flexibilität, erhöhter Effizienz und verringerten Kosten führt. Dabei wird dieser Wandel von unterschiedlichen Faktoren getrieben, die teilweise unabhängig voneinander sind, so dass der zukünftige Ablauf der Veränderung noch nicht vollständig vorhersehbar ist.

Dieser Bericht fasst zusammen, welche konkreten Technologien diesen Wandel ermöglichen und welche weiteren Herausforderungen dabei entstehen.

1.1 Smart Energy

Viele Gegebenheiten im Energiesektor sind aktuell einem starken Wandel unterworfen. Hierbei können moderne Methoden der Informations- und Kommunikationstechnologie einen wichtigen Beitrag zu ei-

¹Das deutsche Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik definiert *kritische Infrastrukturen* als „Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden“ [3].

nem intelligenten Umgang mit der limitierten Ressource der elektrischen Energie leisten, beispielsweise was die Optimierung von verteilter Produktion – auch aus alternativen Energiequellen – und die Steuerung der Nachfrage angeht. Unterstützt wird dieser Beitrag durch verschiedene technologische Fortschritte der letzten Jahre insbesondere durch Miniaturisierung, Leistungssteigerung und Verbesserung der Kommunikationsmöglichkeiten. Derartige Lösungen für einen schlaueren und hochoptimierten Umgang mit elektrischer Energie werden häufig mit dem Attribut „Smart“² ausgezeichnet [39, 49]. Im vorliegenden Bericht soll sich der Begriff „Smart Energy“ auf die Summe aller solcher Technologien und Massnahmen im Umgang mit Energie, insbesondere elektrischer Energie beziehen.

In der Vergangenheit haben verschiedene Autoren jeweils einzelne technologische Aspekte von Smart Energy im Detail analysiert, die wichtige Bestandteile auf dem Weg zu einer intelligenten Energienutzung sind. Beispiele solcher Aspekte sind der Einsatz von Multiagentensystemen zur Umgestaltung der Stromversorgungsnetze, Technologien zur Überwachung und Steuerung des Energieverbrauchs, Webservices als Integrationstechnologie sowie Methoden der Informationssicherheit [30, 35, 34, 27, 29, 48]. Aufbauend darauf wird der vorliegende Beitrag im folgenden Kapitel zunächst diese technologischen Bausteine zu einem Gesamtbild zusammensetzen.

Anschliessend wird eine Reihe von nicht-funktionalen Anforderungen diskutiert, die für ein in der Praxis einsetzbares Gesamtsystem von mindestens derselben Bedeutung sind wie die rein technischen Lösungsbestandteile.

Einige ungelöste Probleme, die adressiert werden müssen, bevor die Vision der Smart Energy Wirklichkeit werden kann, werden schliesslich am Ende des Berichts hervorgehoben.

Viele der im folgenden angeführten Beispiele von Technologien und Projekten betrachten die konkreten Anforderungen aus einer europäischen und teilweise schweizerischen Sicht. Dabei wird jedoch versucht, die regional unabhängigen Prinzipien herauszuarbeiten, so dass das Gesagte soweit wie möglich auch ausserhalb des genannten geographischen Raums Gültigkeit besitzt.

1.2 Smart Grid

Ein zentraler Bestandteil des intelligenten Umgangs mit elektrischer Energie ist das sogenannte „Smart Grid“, ein Stromnetz, das im Gegensatz zum heutigen Verteilnetz eine flexiblere Nutzung erlauben soll. Das heutige Stromnetz ist historisch gewachsen und wurde im Wesentlichen auf das Bedürfnis der Verteilung von elektrischer Energie von wenigen zentralen Energieproduzenten hin zu den vielen Verbrauchern zugeschnitten und ist daher stark hierarchisch und unidirektional geprägt. Dies erschwert, dass im grossen Stil stark verteilte alternative und erneuerbare Energiequellen zum Einsatz kommen, da zu deren Steuerung durch das Netz und für die Produktion elektrischer Energie möglichst dort, wo sie benötigt wird, Energie-Einspeisemöglichkeiten, Kommunikationsmechanismen und intelligente Steuerungsalgorithmen nötig sind, die im heutigen Netz in dieser Form nicht vorgesehen sind. Auch die Interaktion zwischen Strom-Produzenten und -Konsumenten, z.B. zur Beeinflussung des aktuellen Verbrauchs über finanzielle Anreizsysteme der Produzenten oder zur Vormeldung bald anfallender Nachfrage durch die Konsumenten, ist mit dem heutigen Energieverteilnetz nicht sinnvoll machbar.

Die verschiedenen hierarchisch angeordneten Netzebenen im gegenwärtigen Stromnetz der Schweiz sind in Abbildung 1 zu sehen. Die einzelnen Verteilnetze sind dabei innerhalb eines Landes mit einem Übertragungsnetz (Abbildung 2) zusammengeschlossen, das in der Schweiz seit 2006 durch Swissgrid³ betrieben wird. Dieses Übertragungsnetz wiederum ist in ein europaweites länderübergreifendes

²Englisch für „klug“, „gewitzt“ oder „raffiniert“. In der Literatur wird *SMART* auch als Abkürzung für die englischen Begriffe „Standards, Monitoring, Accounting, Rethink, Transform“ (Deutsch: Standards, Überwachung, Abrechnung, Umdenken, Umgestaltung) verstanden [49, 50].

³Swissgrid ist eine Aktiengesellschaft mit Sitz in Laufenburg. Aktionäre sind acht grosse Schweizer Elektrizitätsunterneh-

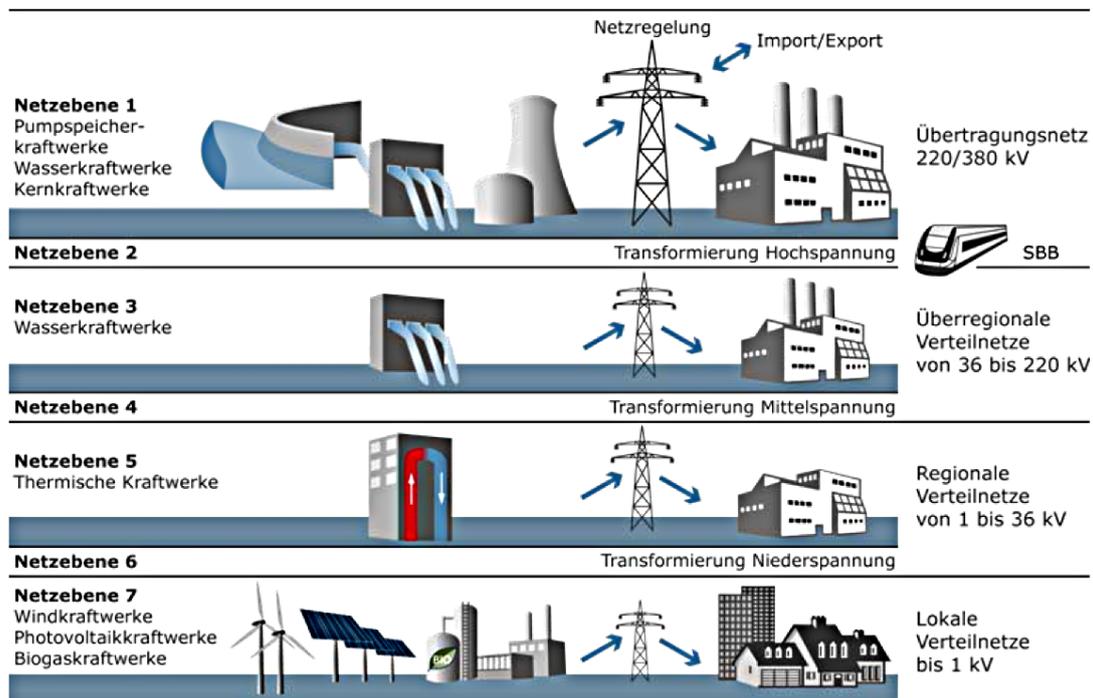


Abbildung 1: Die sieben Schweizer Netzebenen [14]

Verbundnetz zum Austausch elektrischer Energie eingebunden. Sowohl die Steuerung des Schweizer Übertragungsnetzes als auch der Austausch mit dem Ausland werden von einer zentralen Netzleitstelle in Laufenburg aus kontrolliert (Abbildung 3).

Dass dieses Netz auf kommende Anforderungen hin angepasst werden muss, bestätigt implizit auch der CEO von Swissgrid, Pierre-Alain Graf, in einem Vortrag im Januar 2010 [33], wo er im Hinblick auf zukünftige Netzausbauten unter anderem die Aussagen macht: *Swissgrid hat die Aufgabe, das Netz an die Bedürfnisse anzupassen und weiter zu entwickeln. ... Die Schweiz muss neue Technologien einsetzen – Smart Grid.*

Für das Smart Grid werden unter anderem folgende Ziele angestrebt: Die Fähigkeit, elektrische Energie an allen Stellen des Netzes einspeisen zu können, insbesondere aus alternativen und erneuerbaren Energiequellen; die Möglichkeit, jederzeit mittels sogenannter „Smart Meter“⁴ die aktuelle Verbrauchssituation bei den Endabnehmern aus der Ferne abzufragen und bei Bedarf auf den Verbrauch durch Fernsteuerung oder Preismassnahmen einzuwirken; die Fähigkeit zur Komplexitätsreduktion mittels hierarchischer Strukturierung durch sogenannte „Microgrids“⁵; Unterstützung für den Zusammenschluss vieler kleiner und unabhängiger Stromproduzenten zu virtuellen Kraftwerken, die ähnlich heutigen Grosskraftwerken Garantien zu ihrer Leistung abgeben können. Daneben erwartet man vom Smart Grid einen einheitlichen Zugang für alle Netzteilnehmer, sowie erhöhte Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit [30]. Dazu ist es nötig, dass alle Knoten im Stromnetz miteinander kommunizieren und interagieren können und in der Lage sind, gemeinsame Entscheidungen treffen zu können in Hinblick auf übergeordnete

men.

⁴Moderne digitale Stromzähler, die in kurzen Zeitintervallen über geeignete Kommunikationstechnologien automatisch aus der Ferne ausgelesen werden können und es ermöglichen, ebenfalls aus der Ferne auf Verbraucher im Haushalt feingranular Einfluss zu nehmen.

⁵Ein kleines Teilnetz des Stromnetzes, bestehend aus Konsumenten und kleinen Energieproduzenten, das im Bedarfsfall autonom betrieben werden kann.

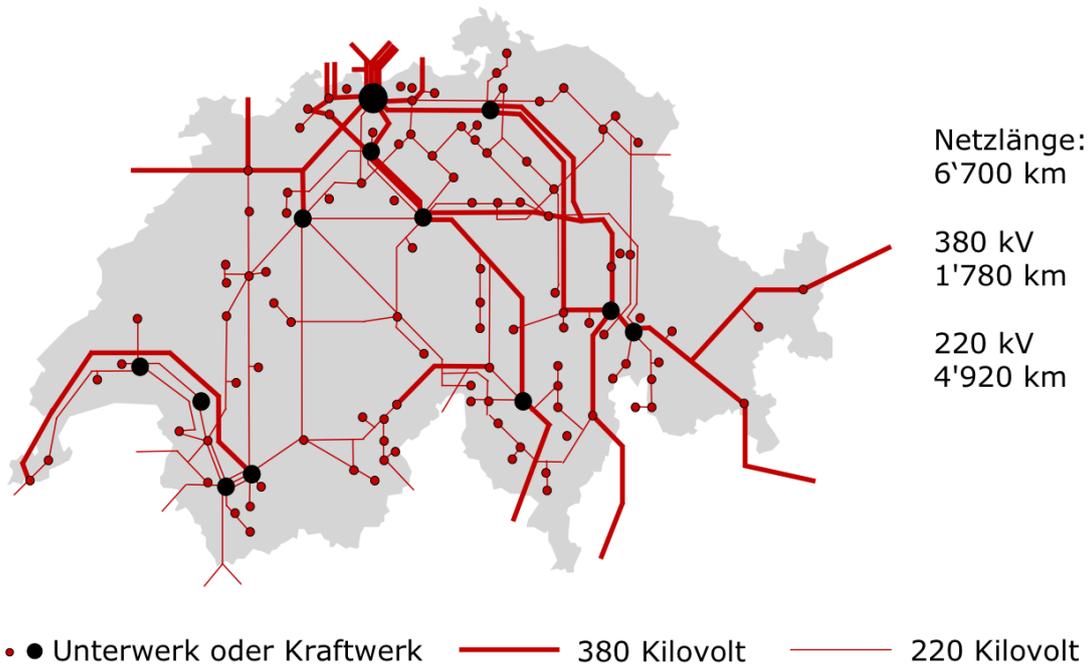


Abbildung 2: Das heutige Schweizer Übertragungsnetz [14]



Abbildung 3: Die Netzleitstelle von Swissgrid in Laufenburg [13]

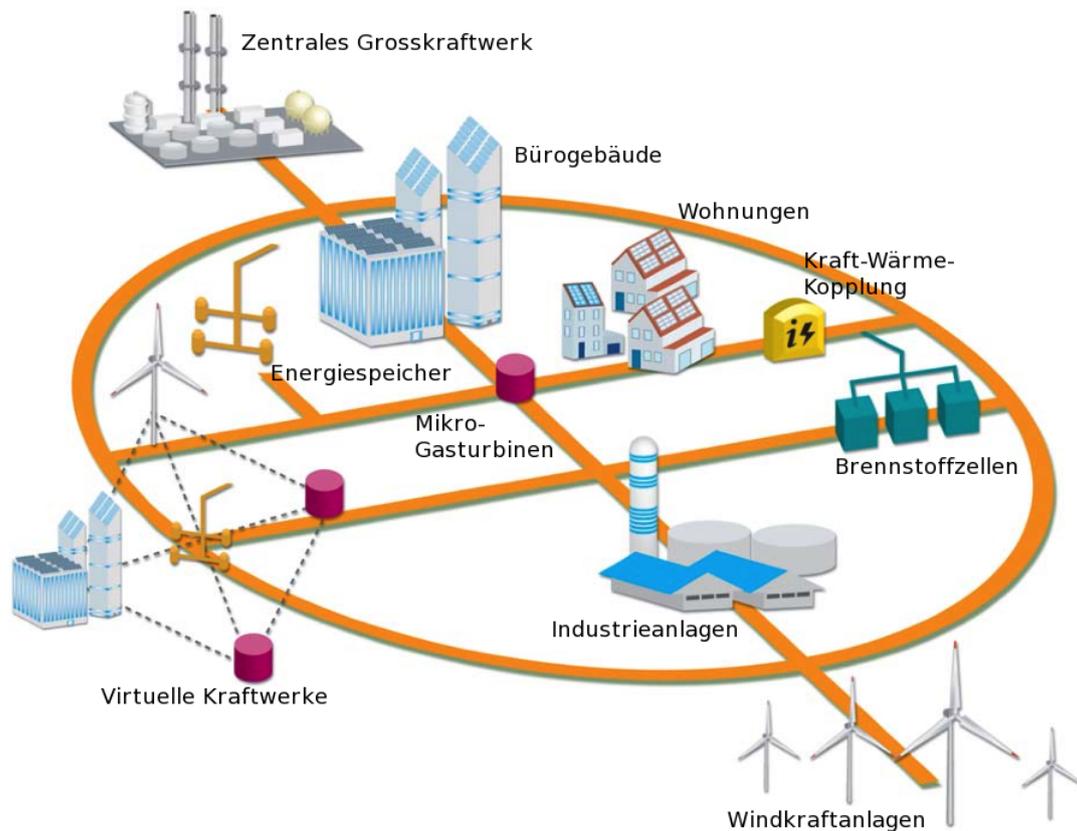


Abbildung 4: Mögliche Teilnehmer am Smart Grid [19]

Ziele wie Versorgungssicherheit und Netzstabilität. Dies wiederum erfordert klar definierte Standards, gerade auch Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle. Welche Teilnehmer an diesem zukünftigen Stromnetz beteiligt sein könnten, zeigt beispielhaft Abbildung 4.

Erste Schritte in Richtung hin auf das zukünftige Smart Grid werden derzeit in verschiedenen Ländern unternommen. In Italien beispielsweise hat der grösste Stromversorger, die Enel SpA, den Grossteil der Hausanschlüsse mit intelligenten Stromzählern ausgerüstet, die in der Lage sind, mittels Kommunikation über die Stromleitungen nicht nur den aktuellen Zählerstand auszulesen, sondern darüber auch ferngesteuert werden können. Damit ist es möglich, zum Zweck des Lastausgleichs an unterschiedlichen Tageszeiten verschiedene Tarife anzubieten oder auch die maximal beziehbare Leistung an einem Hausanschluss dynamisch zu begrenzen oder den Anschluss ganz abzuschalten. Obwohl diese Stromzähler in den Medien oft als „Smart Meter“ bezeichnet werden [16], handelt es sich nach der Definition, die beispielsweise von Deconinck verwendet wird, nicht um Smart Meter sondern um „Advanced Metering Infrastructure“⁶ [31].

Auch in der Schweiz gibt es erste Versuche mit Smart Meters. Beispielsweise werden im Kanton Zürich und in der Stadt Zürich ab Mai 2010 bzw. Herbst 2010 in Pilotprojekten jeweils mehrere hundert Haushalte mit intelligenten Stromzählern ausgerüstet, wobei die in Viertelstunden-Intervallen gemessenen Daten über den Stromverbrauch einerseits an die Elektrizitätswerke übertragen werden, andererseits aber auch dem Endkunden zusammen mit den angefallenen Kosten auf einem Anzeigegerät oder im Internet dargestellt werden. Diese Feldversuche werden von den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich (EKZ) bzw. den Elektrizitätswerken der Stadt Zürich (ewz) durchgeführt [37].

⁶Englisch für „Fortgeschrittene Stromzähler-Infrastruktur“.

Zudem führt ewz derzeit neben dem Leitsystem ein Netzqualitätssystem ein, das eine kontinuierliche Überwachung der eigenen Anlagen und von Anlagen von Grosskunden ermöglicht [20]. Auch diese Form der Messdatenerfassung ist ein weiterer Schritt in Richtung des Smart Grid.

2 Die Informatik als Wegbereiterin zur Smart Energy

Dass die fossilen Energiereserven der Erde nicht in unbegrenzter Menge verfügbar sind, ist spätestens seit dem Bericht „Die Grenzen des Wachstums“ des Club of Rome im Jahr 1972 und der nachfolgenden Diskussion auch der Öffentlichkeit bekannt [40]. Die absehbare Verknappung der natürlichen Ressourcen führt zur Frage, ob, wie weit und auf welche Art sich der momentane Lebensstandard auf der Welt erhalten lässt, gerade auch unter dem Hintergrund, dass der Ressourcenverbrauch in Schwellenländern stetig ansteigt. Eng verknüpft damit ist die Problematik der Energiesicherheit, also dem Ziel, eine zuverlässige Energieversorgung sicherzustellen und dabei die Abhängigkeit der Energieversorgung von fossilen Brennstoffen und die Abhängigkeit von deren Förderländern zu verringern. Daneben führt die Zunahme von CO₂ in der Atmosphäre – insbesondere durch die Verbrennung fossiler Energieträger – zu einer Erwärmung des Weltklimas mit schwerwiegenden Folgen.

In dieser Situation erscheint es als selbstverständlich, dass alle gesellschaftlichen Gruppen aufgefordert sind, ihren Beitrag zu leisten, der die genannten Probleme adressiert [26]. Selbst wenn eine vollständige Lösung heute noch nicht oder nur schwer erreichbar erscheinen sollte, sind auch Beiträge, die eine Verbesserung in Teilbereichen ermöglichen, von Nutzen. Daher ist auch die Informatik, bei der der Fortschritt seit vielen Jahren in hohem Tempo anhält, eine der Disziplinen, die als Wegbereiter zu einem nachhaltigeren Einsatz von Energie dienen können.

Im Umgang mit elektrischer Energie findet seit einigen Jahren in vielerlei Hinsicht ein Paradigmenwechsel statt. Mattern/Staake/Weiss identifizieren dabei folgende fünf wesentlichen Veränderungen [39]:

- *Wahrnehmung als wertvolle und begrenzte Ressource:* Nachdem elektrische Energie lange Zeit als nahezu unbegrenzt verfügbar empfunden wurde, hat sich unterdessen die Erkenntnis durchgesetzt, dass eine zuverlässige Versorgung mit Strom ein wertvolles und keineswegs selbstverständliches Gut ist. Eine ablehnende Haltung der Bevölkerung gegenüber dem Bau neuer konventioneller Kraftwerke zur Stromerzeugung geht beispielsweise einher mit dem Bewusstsein, dass elektrische Energie knapp ist. Dieses Bewusstsein fördert schliesslich auch den individuellen Wunsch, den Energieverbrauch zu reduzieren.
- *Liberalisierung:* Die zunehmende Deregulierung der Strommärkte, die insbesondere in Europa von den Regierungen vorangetrieben wird, erfordert eine bessere Unterstützung der Prozesse durch Methoden der Informationstechnik. Gleichzeitig bietet sie Chancen für eine Veränderung der Energielandschaft weg von den starren historisch gewachsenen Strukturen hin zu mehr Wettbewerb und innovativen umweltschonenden Angeboten.
- *Verlagerung zu dezentraler Produktion:* Strom wird künftig im Vergleich zu heute wesentlich mehr an vielen verteilten Orten erzeugt werden. Insbesondere die Nutzung erneuerbarer Energien geschieht oft in einer grossen Zahl von dezentralen Anlagen, beispielsweise in Form von Solarenergie auf Gebäudedächern oder kleinen Windkraftanlagen. Auch andere innovative und vielversprechende Ideen wie Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen in Wohn- und Bürogebäuden sind inhärent in der Fläche verteilt. Dieser Trend weg von grossen zentralisierten Kraftwerken erfordert zu seiner Umsetzung allerdings eine Umstrukturierung des bestehenden Übertragungsnetzes hin zu einem bidirektionalen Netz, das in der Lage ist, Energie in allen Richtungen zu übertragen, damit lokal nicht benötigte Energie an anderen Orten zur Verfügung gestellt werden kann.
- *Interaktion zwischen Produktion und Abnehmern:* Anstatt nur die Stromproduktion jeweils an den aktuellen Verbrauch anzupassen, wie dies heute in der Regel zumindest bei Haushalten geschieht, macht es Sinn, dass sich alle Beteiligten am Stromnetz gemeinschaftlich an den Entscheidungen beteiligen, wo und wieviel elektrische Energie zu welchem Zeitpunkt produziert, übertragen und

konsumiert wird. Ein Weg dazu können computerunterstützte Energie-Marktplätze sein, die es auch erlauben würden, dass sich eine Gruppe von Kleinproduzenten zu einem virtuellen Großproduzenten zusammenschließt und so als zuverlässiger Anbieter auf dem Markt auftritt.

- *Situationsgerechte Energienutzung*: Die künftig verfügbare elektrische Leistung ist gerade bei erneuerbaren Energiequellen im Vergleich zu herkömmlichen Kraftwerken deutlich schwerer vorhersagbar und steuerbar, wodurch es vorkommen kann, dass elektrische Energie zur Verfügung steht, obwohl sie nicht benötigt wird. Es liegt daher nahe, dass ein Wandel von den heutigen einfachen Verbrauchern hin zu intelligenten „Energie-Nutzern“ stattfindet. Letztere würden elektrische Energie – oft zu vorteilhaften Konditionen – auch dann abnehmen, wenn sie aktuell gar nicht benötigt wird und sie entweder zwischenspeichern oder vorausschauend nutzen.

Die genannten Veränderungen eröffnen Chancen für eine Transformation unseres Umgangs mit elektrischer Energie hin zu einer nachhaltigeren Nutzung. Viele dieser neuen Möglichkeiten sind allerdings nur durch eine signifikante maschinelle Steuerung und Automatisierung möglich. Beispielsweise ist es zur Unterstützung der intelligenten Nutzung von überschüssiger elektrischer Energie notwendig, dass alle Beteiligten innert kurzer Zeit über die aktuelle Situation informiert sind, automatisiert Preise aushandeln können und teil-autonom Entscheidungen treffen können, so dass trotzdem die übergeordneten Ziele der Netzstabilität und Versorgungssicherheit gewährleistet bleiben. Um diese Ziele zu erreichen, sind leistungsfähige Kommunikationsnetze, einheitliche Kommunikationsstandards und intelligente Mess- und Steuerungseinrichtungen an allen Stellen des Stromnetzes erforderlich, insbesondere auch bei den Endabnehmern, die zukünftig häufig auch als Energielieferanten auftreten werden.

Neben den absehbaren Paradigmenwechseln haben gleichzeitig die Informations- und Kommunikationstechnologien (ICT) in vielen Bereichen enorme Fortschritte gemacht. Einige Beispiele dafür sind die folgenden Bereiche, die nach Mattern auch ein Teil der treibenden Kräfte für das „Ubiquitous Computing“⁷ sind [38]:

- Über die letzten Jahrzehnte hat sich der Trend zur Steigerung der Rechenleistung bei gleichzeitiger Kostenreduktion stets fortgesetzt.
- Die anhaltende Miniaturisierung hat zusammen mit der stark gestiegenen Rechen- und Speicherkapazität dazu geführt, dass leistungsfähige Computer heute verteilt an sehr vielen Stellen und für den Endanwender praktisch „unsichtbar“ eingesetzt werden können.
- Kommunikationsinfrastruktur und Datennetze sind heute weit verbreitet und in vielfältiger Weise nutzbar.
- Der Trend zu offenen Systemen aufbauend auf allgemein akzeptierten Standards ermöglicht es, bestehende Infrastruktur auf immer neue und unvorhergesehene Art nutzen zu können.

Die Paradigmenwechsel im Energiesektor in Kombination mit den gewaltigen Fortschritten in den Informations- und Kommunikationstechnologien lassen es als realistisch erscheinen, dass die Informatik heute in der Lage ist, einen signifikanten Beitrag zu einer nachhaltigen Energienutzung zu liefern. Die informationstechnische Unterstützung vieler bislang utopischer Szenarien ist dadurch in greifbare Nähe gerückt.

Die folgenden Abschnitte beschreiben Anwendungsgebiete, in denen es plausibel erscheint, dass die beabsichtigten Ziele speziell durch den Einsatz von Informatikmethoden erreicht werden können, weil erst dadurch komplexe Regelungsaufgaben zwischen vielen Beteiligten, kurzfristig agierende Energiemärkte

⁷Nach Wikipedia „Die Allgegenwärtigkeit der rechnergestützten Informationsverarbeitung“ [15].

oder die rasche Beeinflussung einer grossen Zahl von Verbrauchern realisiert werden können. Auch zur leicht verständlichen Visualisierung komplexer Verbrauchszusammenhänge ist der Einsatz von Informationstechnologie vielversprechend. Die vorgestellten Gebiete betreffen zudem Szenarien, bei denen man sich einen besonders grossen Nutzen erwartet, sei es durch eine erhöhte Problemwahrnehmung in der Bevölkerung, durch die erstrebenswerte Möglichkeit zum Einsatz alternativer Energiequellen oder durch die zeitliche Optimierung von Produktion und Verbrauch elektrischer Energie.

Für die drei aufgeführten Anwendungsgebiete wird jeweils zunächst das Ziel beschrieben, dann die Herausforderungen genannt und schliesslich eine Menge von Technologien vorgestellt, die in Kombination einen wesentlichen Beitrag zur Zielerreichung leisten können. Einzelne Technologien werden so zu „Mosaiksteinchen“ im Gesamtbild einer Problemlösung.

Im einzelnen werden Wege vorgestellt, wie der Verbrauch elektrischer Energie in Haushalten reduziert werden kann, mit welchen Methoden ein grossflächiger Einsatz von erneuerbaren und alternativen Energiequellen ermöglicht werden kann, und welche Möglichkeiten es gibt, das Stromnetz effizienter und gleichmässiger auszulasten.

Daneben gibt es noch andere Bereiche, in denen „Smart Energy“ zum Zug kommen kann, die hier jedoch nicht vertieft betrachtet werden sollen. Beispielweise kann die persönliche Mobilität mit sinnvoll eingesetzten ICT-Methoden energieeffizienter gestaltet werden [32, 44]. Schliesslich geht die technische Entwicklung auch hin zu intelligenteren Gebäuden, die die Bewohner bei der sparsamen Nutzung von elektrischer und anderer Energie unterstützen [28].

2.1 Reduktion des Verbrauchs von elektrischer Energie in Haushalten

In der Schweiz sind Haushalte für gut 30% des Verbrauchs an elektrischer Energie verantwortlich [12]. Der absolute Verbrauch hat dabei in der Vergangenheit fast jedes Jahr zugenommen [11]. Die anderen Bereiche, die den wesentlichen Verbrauch an elektrischer Energie verursachen, sind Industrie (ca. 33%), Dienstleistungen (ca. 31%) und Verkehr (ca. 6%), was in Abbildung 5 visualisiert ist. Bei den letzteren Bereichen handelt es sich oftmals um Grossabnehmer und Firmen, bei denen das Bewusstsein über den eigenen Stromverbrauch eher vorhanden ist und eine Lenkung des Verbrauchsverhaltens, insbesondere durch finanzielle Anreize, bereits bisher erfolgreich war.

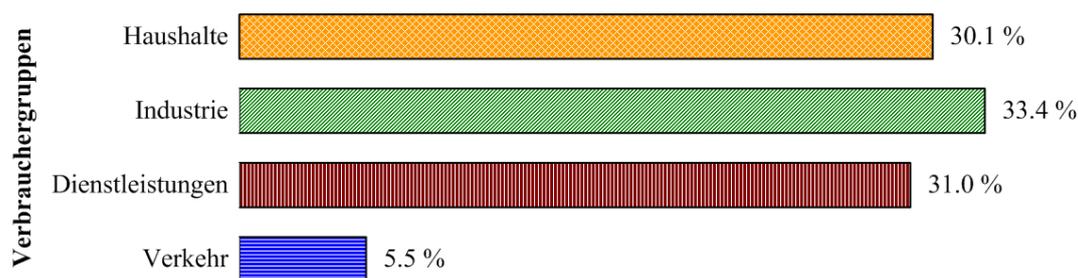


Abbildung 5: Prozentuale Aufteilung des Verbrauchs an elektrischer Energie in der Schweiz. Daten laut Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2008 [12].

Hingegen ist es im Fall der privaten Haushalte deutlich schwerer, eine signifikante Reduktion des Verbrauchs zu erreichen, da man es mit einer sehr grossen Zahl von individuellen Einzelpersonen zu tun hat und die breite Bevölkerung häufig nur ein sehr begrenztes Verständnis davon hat, wofür im eigenen Haushalt elektrische Energie verbraucht wird. Gerade deswegen ist davon auszugehen, dass der Gesamtkonsum an elektrischer Energie in Haushalten verringert werden kann, wenn die Ursachen des

Verbrauchs und seine Aufteilung auf die einzelnen elektrischen Geräte transparenter gemacht kann. Ob die erreichbare Verringerung einen signifikanten Anteil des gesamten Stromverbrauchs ausmacht, ist jedoch zweifelhaft, da der Verbrauch vieler Geräte vom Konsumenten nicht wesentlich beeinflusst werden kann. Zudem stammt beispielsweise die benötigte Energie für Heizung und Warmwasser in Haushalten oft von fossilen Brennstoffen, deren Verbrauch stark von anderen Faktoren abhängt (z.B. die absolute Menge des verbrauchten Warmwassers), teilweise verhaltensunabhängig ist (z.B. die Qualität der Gebäudeisolation) und nicht in direktem Zusammenhang mit dem Stromverbrauch steht, zumindest sofern Heizung und Warmwassererzeugung nicht elektrisch betrieben werden.

Und trotzdem hat das Ziel, Privatverbrauchern die Zusammensetzung ihres Bezugs an elektrischer Energie jederzeit verständlich zu visualisieren und sie gleichzeitig dazu zu bewegen, den Verbrauch nachhaltig zu verringern, auch einen sehr wichtigen indirekten Effekt: Durch die intensive Beschäftigung mit dem Thema Stromverbrauch dringt die Problematik der „Smart Energy“ stärker ins Bewusstsein der Bevölkerung vor, wodurch diese schliesslich auch anderen einschneidenderen Veränderungen, die zunächst als wenig attraktiv wahrgenommen werden, aufgeschlossener gegenübersteht.

Um die genannten Ziele zu erreichen, ist es nötig, einerseits den Energieverbrauch möglichst feingranular bestimmen zu können und ihn andererseits dem Konsumenten auf verständliche Art und Weise zu visualisieren. Damit die dadurch möglicherweise erreichte Verbrauchsreduktion auch nachhaltig bleibt, sind Strategien nötig, wie das Interesse am Energiesparen dauerhaft wachgehalten werden kann.

Zur Bestimmung des Energieverbrauchs gibt es unterdessen eine Reihe von zentralen und verteilten Lösungen [34, 27]. Die Visualisierung kann numerisch und grafisch mit eigens dafür geschaffenen Geräten oder aber auf bereits vorhandenen Endgeräten wie modernen Mobiltelefonen oder Personal Computern erfolgen [34, 29, 39]. Damit die gemessenen Verbrauchsdaten dargestellt werden können, müssen sie zunächst von den einzelnen Mess-Stellen dorthin übertragen werden, wo die Aufbereitung für die Visualisierung stattfindet. Dies ist entweder das darstellende Gerät selbst oder Infrastruktur dazwischen, z.B. ein Web-Server, auf den wiederum mit anderen Endgeräten wie beispielsweise einem Web-Browser zugegriffen wird. Als einheitliches und gängiges Protokoll für diese Übertragung bieten sich Web-Services an, die von vielen Software-Plattformen unterstützt werden und zudem die Integration von Komponenten verschiedener Anbieter vereinfachen [29].

Um schliesslich zu erreichen, dass Konsumenten ein dauerhaftes Bewusstsein für das Ziel der Reduktion des Energieverbrauchs behalten, werden in der Literatur Anreizsysteme wie Spiele oder Wettbewerbe mit sozialen Komponenten vorgeschlagen, z.B. der Vergleich mit einer Gruppe anderer Konsumenten. Dies wird häufig unter dem Begriff „Engagement Strategies“ zusammengefasst [27, 39].

2.2 Einsatz von erneuerbaren und alternativen Energiequellen

Die nichterneuerbaren Energiequellen, die heute einen grossen Teil der Energieversorgung übernehmen, sind nicht unbegrenzt verfügbar. Eine mögliche Alternative gerade auch zur Produktion elektrischer Energie sind erneuerbare Energiequellen wie Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen⁸. Eine EU-Richtlinie vom 29. April 2009 schreibt beispielsweise vor, dass die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union Gesetze zur Förderung von erneuerbaren Energien erlassen müssen, damit bis im Jahr 2020 der Anteil dieser Energien am gesamten Energieverbrauch der EU mindestens 20% beträgt [10]. Ausserdem existieren alternative Energiequellen wie Blockheizkraftwerke⁹, die in der Lage sind, bei hohem Wirkungsgrad in einzelnen Gebäuden lokal gleichzeitig sowohl Wärme für Heizung und Brauchwassererwärmung als auch elektrische Energie zu erzeugen.

⁸Anlagen zur Produktion von elektrischer Energie aus Wind oder Sonnenlicht.

⁹Anlagen zur Produktion von elektrischer Energie und Wärme, die auf dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung basieren. In der Regel werden fossile Brennstoffe eingesetzt, teilweise auch nachwachsende Rohstoffe.

Beide Szenarien, die erneuerbaren und die alternativen Energiequellen haben eines gemeinsam: Im Vergleich zu heutigen zentralen Grosskraftwerken wird an wesentlich mehr Orten jeweils eine wesentlich kleinere Menge an Energie produziert. So ist ein typisches Kern- oder Kohlekraftwerk heute in der Lage, pro Kraftwerksblock eine Leistung von 450 MW–1600 MW abzugeben. Blockheizkraftwerke haben elektrische Leistungen im Bereich von 10 kW–10 MW und eine einzelne Windkraftanlage eines Windparks schliesslich besitzt eine elektrische Leistung von 1 MW–5 MW [51, 42, 7].

Häufig stellen diese verteilten Orte sogar je nach Situation zu bestimmten Zeiten Produzenten und zu anderen Zeiten Konsumenten von elektrischer Energie dar. Bei den erneuerbaren Energiequellen wie der Erzeugung von Strom aus Wind oder Solarenergie kommt noch hinzu, dass die Produktion nicht gut gesteuert werden kann, da sie von Umweltfaktoren beeinflusst wird. Windkraftwerke zum Beispiel können nur bei geeigneten Wetterbedingungen (nicht zu wenig oder zu viel Wind) Strom produzieren, wobei allerdings eine Reduktion der Leistung im Gegensatz zur Erhöhung in der Regel möglich ist.

Das traditionelle Stromversorgungsnetz stösst hier schnell an die Grenzen, was die Anschlussmöglichkeit und Koordination vieler solcher kleiner und kleinster Produzenten angeht, da es stark hierarchisch ausgelegt ist – eben auf die Verteilung von an wenigen zentralen Stellen produziertem Strom hin zu den Verbrauchern und kaum auf die Koordination der Einspeisung von elektrischer Energie an nahezu beliebigen Stellen des Netzes.

Vorschläge für die Lösung dieser Problematik gehen in verschiedene Richtungen: Zum einen ist die fließende Transformation des heutigen Stromnetzes in ein sogenanntes „Smart Grid“ anzustreben, wie es in Kapitel 1 vorgestellt wurde. Das Ziel ist, dass dieses Smart Grid allen Benutzern einen einheitlichen Zugang ermöglicht, der die verteilte Energieproduktion und erneuerbare Energiequellen unterstützt, unabhängig davon, ob sie Teil einer zentralen gemeinsamen Steuerung durch lokale Betreibergesellschaften sind oder aber ihre Produktion autonom anbieten. Zudem soll das Smart Grid mehr Flexibilität als das heutige Netz bieten, damit auf zukünftige Änderungen dynamisch und möglichst ohne Umbauten reagiert werden kann [19].

Weiter soll im Smart Grid die Bildung von Microgrids möglich sein, kleinen lokalen Teilnetzen, die im Bedarfsfall autonom agieren können, was die Zuverlässigkeit und die globale Ausfallsicherheit erhöht. Zur Steuerung eines solchen intelligenten Stromnetzes werden Multiagentensysteme vorgeschlagen. Multiagentensysteme in der Informatik sind Systeme, die aus mehreren kommunizierenden Einheiten aufgebaut sind, z.B. Software-Agenten, die kollaborativ die Lösung eines Problems anstreben. Dieses Konzept wird in der Informatik seit längerem erforscht und wird als eine Möglichkeit gesehen, die Skalierbarkeit zu erreichen, die die grosse Anzahl kommunizierender Komponenten im Smart Grid erfordert [30].

Ein weiterer Ansatz, um den Einsatz von alternativen und erneuerbaren Energiequellen zu ermöglichen, ist deren Einbindung in ein grosses virtuelles Kraftwerk¹⁰. Ein solches virtuelles Kraftwerk kann bei entsprechender Auslegung ähnliche Leistungsmerkmale wie konventionelle Kraftwerke besitzen und daher einfacher ins Netz und die Planung der Energieproduktion integriert werden [47].

2.3 Effizientere und gleichmässige Auslastung des Stromnetzes

Der Stromverbrauch von Privathaushalten ist heute im Tagesverlauf sehr stark schwankend. Abbildung 6 zeigt das Lastprofil eines britischen Haushalts [52]. Man sieht deutlich, wie sich die vom Stromnetz bezogene Energie im Tagesverlauf ändert. Spitzen im Stromverbrauch entstehen beim Einschalten grosser

¹⁰Logische Zusammenfassung einer grossen Zahl von kleinen Kraftwerken unterschiedlicher Typen, die durch geeignete Steuerung in der Summe eine einheitliche vorhersehbare Produktionsleistung erbringen können und damit wie ein einzelnes konventionelles Kraftwerk am Strommarkt als ein zentraler Anbieter auftreten können, obwohl die Energieproduktion geographisch auf viele Standorte kleiner und teilweise schwankender Leistung verteilt sein kann.

Verbraucher, beispielsweise Heisswasserbereiter, Ofen, Herd, Waschmaschine oder Geschirrspüler. Im Beispiel beträgt die bezogene Leistung im Tagesdurchschnitt nur 0.49 kW, die maximal auftretende Last ist jedoch 7.18 kW, immerhin mehr als das 14-fache des Tagesdurchschnitts.

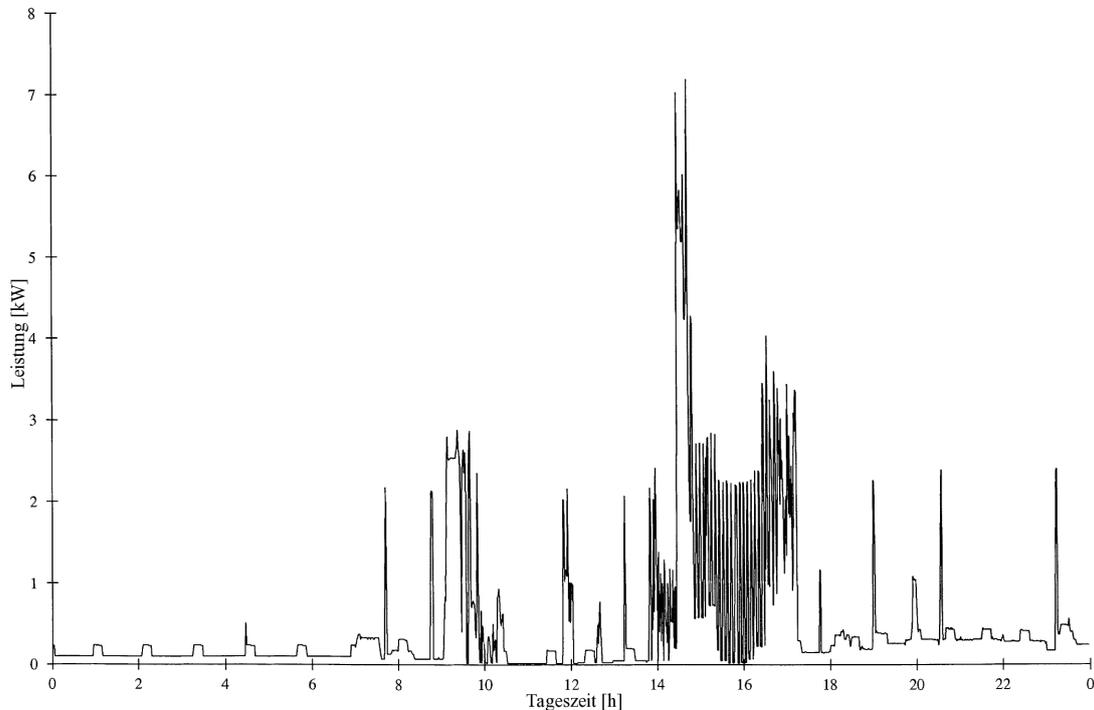


Abbildung 6: Beispiel eines Lastprofils eines Haushalts im Tagesverlauf in Grossbritannien (nach [52])

Eine grosse Zahl von Haushalten zusammen verursacht in der Summe zwar keine so starken und kurzfristigen Schwankungen mehr, da die Einschaltzeitpunkte statistisch verteilt sind. Dennoch ist der Energiebedarf der Summe aller Haushalte zu bestimmten Zeiten, beispielsweise Mittags oder Abends, deutlich höher als zu Schwachlastzeiten. In der Schweiz schwankt die Stromproduktion im Tagesverlauf etwa um den Faktor 2 zwischen dem Produktionsminimum am Morgen um 5 Uhr und dem Maximum am Mittag gegen 12 Uhr [5].

Da im Stromnetz immer genau so viel Energie produziert und eingespeisen werden muss, wie verbraucht wird, führt das dazu, dass für die Spitzenzeiten elektrische Energie aus Quellen benötigt wird, deren Energieabgabe im Tagesverlauf einfach gesteuert werden kann. Dazu eignen sich beispielsweise Wasser-Speicherkraftwerke und bedingt auch Kohlekraftwerke. Da für Strom aus solchen Quellen zu Spitzenzeiten eine hohe Nachfrage besteht, sind auch die Kosten entsprechend hoch, die die Elektrizitätsversorgungsunternehmen den entsprechenden Produzenten zu zahlen haben.

Um bei Bedarf auf kurzfristige unvorhergesehene Schwankungen im Stromkonsum schnell reagieren zu können, werden zudem mit geeigneten Produzenten Verträge über die Verfügbarkeit der sogenannten Regelleistung geschlossen. Hierbei fallen bereits nur für die Garantie, dass die Möglichkeit besteht, im Bedarfsfall kurzfristig elektrische Energie zu beziehen, Kosten an; ein tatsächlich erfolgter Energiebezug wird zudem separat verrechnet.

Ein weiterer Nachteil der grossen Schwankungen im Tagesverlauf ist, dass die Kapazität des gesamten Netzes auf die maximal auftretende Belastung ausgelegt sein muss. Aus den genannten Gründen ist es offensichtlich, dass die Ungleichverteilung ineffizient ist und ein Ausgleich anzustreben ist, beispielsweise indem zu Spitzenzeiten nicht zwingend benötigte grosse Verbraucher abgeschaltet werden.

Für diese Anforderung, das Stromnetz gleichmässiger auszulasten und damit effizienter zu nutzen, bieten sich ebenfalls neue Lösungen an, die zumindest teilweise nur dank entsprechender Unterstützung durch Informations- und Kommunikationstechnologien realisiert werden können. Wie bereits in Abschnitt 2.1 erläutert, beziehen sich die Überlegungen hier im wesentlichen auf Haushalte, da das Optimierungspotential bei industriellen Grossverbrauchern deutlich grösser und aufgrund der kleineren Zahl beteiligter Parteien leichter auszuschöpfen ist.

Grundsätzlich bietet der Einsatz von modernen Stromzählern in den Haushalten, sogenannten „Smart Meters“, nicht nur die Möglichkeit, die bislang bezogene Energiemenge sowie den aktuellen Verbrauch aus der Ferne abzufragen, sondern häufig ist auch vorgesehen, auf dem umgekehrten Weg auf das Verbrauchsverhalten im Haushalt Einfluss zu nehmen, wodurch beispielsweise zu Spitzenzeiten Grossverbraucher gedrosselt oder abgeschaltet werden könnten [35].

Ein neuer Typ solcher Grossverbraucher, die in Zukunft an Bedeutung zunehmen werden, sind elektrisch betriebene Fahrzeuge, deren Energiespeicher regelmässig aufgeladen werden muss. Falls es ihr Nutzungsprofil zulässt, kann der Aufladevorgang bevorzugt zu Zeiten stattfinden, zu denen elektrische Energie in ausreichender Menge vorhanden ist und daher zu günstigen Konditionen angeboten wird. Ausserdem bieten sich Elektroautos auch als interessanter aktiver Teilnehmer am Stromnetz der Zukunft an: Es existieren Ideen, nach denen der Energiespeicher in den Fahrzeugen, solange sie am Netz angeschlossen sind, als flexibler Puffer genutzt werden könnte, der in Spitzenzeiten Energie ins Netz abgibt und zu Schwachlastzeiten Energie aufnimmt und speichert. Gerade für die erneuerbaren Energiequellen, deren Leistungsabgabe schwer kontrollierbar und vorhersagbar ist, wäre dies eine Möglichkeit, die Schwankungen in der Produktionsleistung auszugleichen [32].

Im Kontext der hochgradig verteilten Energieerzeugung, wie in Abschnitt 2.2 angesprochen, ist eine solche Anpassung des Verbrauchs an das Angebot von zusätzlicher Bedeutung: Da die Produktionskapazität eines Teils der Energiequellen schwankt und sich dies nicht oder nur wenig beeinflussen lässt, ist es in diesem Szenario noch viel wichtiger, dass eine Kommunikation zwischen Stromanbietern und Abnehmern stattfinden kann, die eine Zusammenarbeit ermöglicht. Auf diese Weise könnte zum Beispiel der Preis für den zu Spitzenzeiten angebotenen Strom kurzfristig variieren und auf die aktuelle Versorgungssituation angepasst werden. Die Abnehmer ihrerseits könnten dann auf aktuelle Spitzenbelastungszustände reagieren, die sich durch stark erhöhte Preise manifestieren, indem sie grosse Verbraucher, die nicht unbedingt zu diesem Zeitpunkt in Betrieb sein müssen, bei Überschreiten einer bestimmten Preisgrenze automatisch abschalten lassen. Für die Energieversorgungsunternehmen hätte dies den Vorteil, dass weniger Energie für Spitzenlast mit den damit verbundenen hohen Kosten beschafft werden [47].

Auch hier gilt wiederum, dass das Stromnetz der Zukunft, das „Smart Grid“, durch seine leistungsfähigen Möglichkeiten wie kollaborierenden Knoten an allen Stellen im Netz, der höheren Flexibilität und der Unterstützung durch intelligente Multiagentensysteme eine wichtige Basis zur dynamischen Gestaltung von Energie-Angebot und -Nachfrage darstellt [30].

3 Nichtfunktionale Anforderungen

Neben den funktionalen Anforderungen an Informatik-Systeme, die beschreiben, welche Aufgaben auf welche Art und Weise zu erfüllen sind, gibt es in der Regel eine Reihe von nichtfunktionalen Anforderungen wie Verfügbarkeit, Sicherheit oder Bedienbarkeit. Glinz definiert nichtfunktionale Anforderungen als „Anforderungen an die Umstände, unter denen die geforderte Funktionalität zu erbringen ist“ [9].

Im Kontext von „Smart Energy“ führen insbesondere die nichtfunktionalen Anforderungen

- Zuverlässigkeit,
- Robustheit,
- Überwachung,
- Skalierbarkeit,
- Sicherheit und
- Privatsphäre

zu neuen Herausforderungen, weshalb sie im Folgenden genauer betrachtet werden.

3.1 Zuverlässigkeit, Robustheit und Überwachung

Das Ziel, das Stromnetz effizienter und gleichmässiger auszulasten (vergleiche Abschnitt 2.3), kann unter anderem zur Folge haben, dass zukünftig weniger Sicherheitsreserven für die Netzkapazität für notwendig empfunden werden, da ja die Last ausgeglichener ist und sogar innerhalb gewisser Grenzen beeinflusst werden kann. Weil ein Abbau von Reserven typischerweise auch mit finanziellen Einsparungen verbunden ist, ist damit zu rechnen, dass der Abbau in der Praxis auch geschehen wird.

Hierbei ist es wichtig, dass der Zuverlässigkeit und Versorgungssicherheit dennoch grosse Aufmerksamkeit geschenkt wird. Gerade weil es sich bei den Steuerungsalgorithmen im Smart Grid um sehr neue Technologie handelt, kann es vorkommen, dass in bestimmten Grenzfällen Massnahmen wie beispielsweise die Laststeuerung oder das kurzfristige Abrufen von elektrischer Energie aus kleinen verteilten Anlagen (z.B. stromgeführten Blockheizkraftwerken) nicht vollumfänglich funktioniert. Eine Möglichkeit, solche Situationen frühzeitig zu erkennen und verhindern, könnte sein, zumindest in der Anfangsphase die eingesetzten Verfahren sehr genau zu überwachen und ausserdem Rückfallebenen vorzusehen, die im Bedarfsfall eingesetzt werden können. Ein Mittel dazu wäre beispielsweise, grössere Mengen an Regelleistung zu bestellen und vorzuhalten als eigentlich nach theoretischer Planung nötig wäre, um auf gänzlich unvorhergesehene Ereignisse in gewissem Umfang reagieren zu können.

Beim Entwurf der verteilten Regelungsalgorithmen zur Automation des Smart Grid ist weiter darauf zu achten, dass diese robust sind. Moslehi/Kumar weisen darauf hin, dass der Einsatz einer hochgradig auf Effizienz optimierten Infrastruktur, die häufig nahe am Kapazitätslimit läuft, gewisse Risiken mit sich bringt [41]. Beispielsweise könnte es zu Instabilitäten kommen, wenn die Aktionen einzelner Agenten zeitlich verzögert bei anderen Agenten eintreffen, wodurch wiederum Aktionen ausgelöst werden, die dem ursprünglichen Ziel entgegenlaufen. Auch das Szenario einer Kettenreaktion ist denkbar, wo eine bestimmte Ausgangslage eine Überreaktion im verteilten Regelungsalgorithmus verursacht, durch die das Stromnetz punktuell die physikalischen Grenzwerte überschreiten würde und einzelne Teile des Netzes abgeschaltet bzw. vom Rest getrennt werden müssten (der sogenannte „Lastabwurf“).

Auch in anderen Bereichen lässt sich beobachten, dass hochoptimierte Systeme anfällig für nur kleine Abweichungen vom Soll-Betriebspunkt sind. Beispielsweise wird das Schweizer Eisenbahnnetz an vielen Stellen näher am Kapazitätslimit betrieben als in anderen Ländern. Dadurch besteht die Gefahr, dass kleine Unregelmässigkeiten wie ein um nur wenige Minuten verspäteter einzelner Zug grössere Auswirkungen auf das Gesamtnetz haben. Auf diese Tatsache hat im November 2008 bei der Vorstellung des neuen, weiter verdichteten Fahrplans 2009 auch der Chef der Schweizerischen Bundesbahnen SBB, Andreas Meyer, hingewiesen [22].

Ein weiteres Beispiel sind die Ereignisse an der US-amerikanischen Börse am 6. Mai 2010, als der Wert des Dow-Jones-Index innerhalb weniger Minuten um rund 10% abstürzte, um kurz darauf fast zum Ausgangspunkt zurückzukehren. Eine erste anschliessende Analyse der Ereignisse zeigte, dass vermutlich verschiedene automatisierte Börsenhandelssysteme, die in den USA rund zwei Drittel aller Börsenaktivitäten abwickeln, mit nicht kompatiblen Regeln miteinander agierten, was zu einer Rückkopplung führte, die den Preissturz einer grossen Zahl von Aktien noch verstärkte, der initial offenbar durch eine fehlerhafte Transaktion ausgelöst wurde [17].

3.2 Skalierbarkeit

Das Smart Grid wird im Endausbau Hunderttausende bis Millionen von aktiven, kommunizierenden Komponenten beinhalten, die versuchen, gemeinsam das Ziel einer sparsamen, umweltfreundlichen und gleichzeitig ökonomischen Stromversorgung zu erreichen. Lösungen für das dabei entstehende verteilte Steuerungsproblem können sich auf Methoden und Technologien stützen, die bereits aus anderen Gebieten bekannt sind. In der Literatur werden beispielsweise entsprechend spezialisierte Multiagentensysteme vorgeschlagen [45]. Dabei wurden die meisten Ideen bislang erst als Simulationen oder als Prototypen in nur kleinem Rahmen demonstriert. Der Nachweis muss jedoch noch erbracht werden, dass dies auch in der Realität bei den oben genannten Grössenordnungen von kommunizierenden Agenten einwandfrei funktioniert, also bei Stromversorgungsnetzen in der Grösse ganzer Länder oder gar Kontinente.

Um die Komplexität zu reduzieren, bietet es sich an, eine Hierarchisierung einzuführen, so dass nicht alle denkbaren Kommunikationsbeziehungen vorkommen. Anstatt beispielsweise jede einzelne Energiequelle mit allen potentiellen Verbrauchern kommunizieren zu lassen, können ganze Teile des Netzes nach aussen gegenüber dem Rest des Netzes von Stellvertreter-Agenten repräsentiert werden, die Aufgaben und Anfragen für das gesamte Teilnetz entgegennehmen und lokal geeignet umsetzen. Die so entstehenden sogenannten „Microgrids“ sind in sich abgeschlossen, agieren bei Bedarf autonom und stellen sich nach aussen als ein einziger Knoten dar. So muss von anderen Teilen des Smart Grid aus nur noch mit dieser virtuellen Komponente anstatt mit all ihren Teilkomponenten kommuniziert werden.

Dieses Vorgehen, Komplexitätsreduktion durch Abstraktion, führt in der Informatik in vielen Fällen zu einer besseren Überschaubarkeit und Handhabbarkeit von komplexen Problemen.

3.3 Sicherheit

Die Frage nach „Sicherheit“ stellt sich im Smart Grid aus verschiedenen Perspektiven. Einerseits ist dies der Schutz vor Betrug in kleinerem oder grösserem Ausmass durch gezielte Manipulation von einzelnen oder mehreren Komponenten. Andererseits ist Sicherheit aber auch nötig als Schutz des Systems selbst gegen bösartige Angreifer, die die Nicht-Verfügbarkeit des Stromversorgungsnetzes erreichen wollen, also einen flächendeckenden oder teilweisen Ausfall verursachen wollen.

Während es bei der Verhinderung von Betrug vor allem um finanziellen Schutz geht, ist letztere An-

forderung eng verwandt mit dem Ziel des *Schutzes kritischer Infrastrukturen*: Ein längerer oder wiederholter weitreichender Ausfall des Stromnetzes kann unsere Gesellschaft und Wirtschaft signifikant beeinträchtigen. Hierbei hat nicht nur der Stromausfall als solches für Bevölkerung und Wirtschaft Einschränkungen zur Folge, sondern es fallen gleichzeitig auch viele andere Infrastrukturen aus, die auf eine zuverlässige Stromversorgung angewiesen sind. Beispiele sind das Transportwesen (öffentliche Verkehrsmittel wie Bahn und Tram; Gütertransporte auf der Schiene; Einschränkungen im Strassenverkehr durch Ausfall von Verkehrsregelungsanlagen); Heizungen und Warmwasserbereitungsanlagen von Gebäuden, die in der Regel auch bei Einsatz von fossilen Brennstoffen auf eine Stromversorgung angewiesen sind; Informations- und Kommunikationstechnologien (Telefonnetz und Mobiltelefonnetz; Internet im privaten Gebrauch sowie zwischen Unternehmen untereinander, beispielsweise zur automatisierten Nachbestellung von Gütern).

Bei länger dauernden Ausfällen, die nicht mit Notstromsystemen überbrückt werden können, wären im Extremfall auch andere Infrastrukturen wie etwa die Wasserversorgung betroffen.

Dass die Sicherheit von heutigen Informatik-Systemen immer wieder unzureichend ist, lässt sich erahnen, wenn man die regelmässig in den Nachrichten publik werdenden Schwachstellen, die sicherlich nur die Spitze des Eisbergs darstellen, extrapoliert. Konkrete Mängel im Kontext von Energieversorgungsunternehmen wurden bereits in der Literatur beschrieben [48].

Die Relevanz des Themas Sicherheit im Smart Grid wird auch dadurch unterstrichen, dass das National Institute of Standards and Technology (NIST), eine für Standardisierungsprozesse zuständige Bundesbehörde der USA, im Februar 2010 einen Entwurf eines Berichts zu Strategie und Anforderungen an Sicherheit im Smart Grid vorgelegt hat [21].

Schliesslich ist ein hohes Mass an Sicherheit auch nötig, um den Schutz der Privatsphäre zu gewährleisten, der im nächsten Abschnitt erörtert wird.

3.4 Privatsphäre

Im traditionellen Stromnetz ist – zumindest im Fall von Privathaushalten – nur sehr wenig Information über die Verbrauchsgewohnheiten vorhanden. In der Regel beschränkt sich dies auf das seltene Ablesen des Stromzählers, z.B. einmal jährlich, wobei allenfalls noch getrennte Daten zum Verbrauch im Niedertarif und im Hochtarif erhoben wurden. Diese wenige Information war ausreichend, um aus den lediglich zwei Energiepreisen für Hoch- und Niedertarif sowie den beiden Verbrauchsmengen die Gesamtkosten zu berechnen.

Im Fall des Smart Grid hingegen ist es für die Erzielung eines maximalen Nutzens sehr wichtig, dass den am Netz beteiligten Komponenten genaue Informationen über aktuellen und zukünftig geplanten Verbrauch, angeschlossene Stromverbraucher und über Präferenzen zum Nutzungsverhalten vorliegen. Auf diese Weise können Stromproduktion und -verbrauch aus globaler Sicht optimal gesteuert werden. Zudem soll sich der Energiepreis in kurzen Abständen dynamisch ändern können, wobei die Länge eines Intervalls mit gleichem Preis in der Grössenordnung von Minuten liegen kann. Dadurch wird es nötig, dass im Stromzähler der Stromverbrauch innerhalb eines jeden solchen Intervalls individuell ermittelt und an das Energieversorgungsunternehmen mitgeteilt wird.

Diese grosse Menge an Information ist allerdings eng mit der Privatsphäre der Bewohner von Privathaushalten verknüpft. Die erhobenen Daten geben grossen Aufschluss über Lebensgewohnheiten und Verhalten von Gruppen von Personen in einem Haushalt. Beispielsweise lässt sich allein aufgrund des Lastprofils eines Haushalts im Tagesverlauf gut erkennen, welche Verbraucher zu welcher Zeit eingeschaltet wurden [52, 46]. Daraus wiederum können verschiedene Rückschlüsse gezogen werden, beispielsweise ob die Bewohner derzeit anwesend sind oder ob und wann sie einer Arbeitstätigkeit nachgehen.

Aus diesem Grund wird die aktuelle Entwicklung, beispielsweise im Zusammenhang mit der Umstellung auf intelligente Stromzähler von den Datenschutzbeauftragten aufmerksam beobachtet [37]. Problematisch ist zudem die Tatsache, dass es sich bei den erfassten Daten in vielen Fällen – ausser bei Einpersonen-Haushalten – nicht um Daten handelt, die einer einzelnen Person zugeordnet werden können. Es ist daher noch offen, inwieweit die entsprechenden Datenschutzbestimmungen der jeweiligen Länder auch tatsächlich anwendbar sind. Das Schweizerische Bundesgesetz über den Datenschutz (SR 235.1) vom 19. Juni 1992 beispielsweise definiert Personendaten, deren Schutz das Gesetz näher beschreibt, als *alle Angaben, die sich auf eine bestimmte oder bestimmbar Person beziehen* [1], was im wörtlichen Sinne nicht auf Daten über Gruppen von Personen zutrifft. Hier ist aufgrund der neuen technischen Entwicklungen eine Präzisierung der Gesetzgeber oder durch Gerichtsentscheide, die als Präzedenzfälle dienen, nötig.

Inwieweit Aspekte der Privatsphäre die Einführung von neuen Technologien zur Umsetzung der Smart Energy beeinflussen, ist sicherlich davon abhängig, wie in die Bevölkerung das Risiko im Umgang mit den erhobenen Daten wahrnimmt. Diese Wahrnehmung wird einerseits bestimmt durch die Art und Weise, wie das Thema in der Öffentlichkeit diskutiert wird, und ob Missbrauchsfälle – beispielsweise durch unzureichende Sicherheitsmassnahmen – publik werden. Gleichzeitig gibt es Anzeichen dafür, dass zumindest ein Teil der Bevölkerung ihrer Privatsphäre im Umgang mit modernen Technologien immer weniger Bedeutung zumisst. Beispielsweise stellen viele Menschen persönliche Informationen über sich selbst und andere auf Internet-Plattformen wie Facebook¹¹ der weltweiten Öffentlichkeit zur Verfügung. Auch die Tatsache, dass Mobilfunkbetreiber technisch in der Lage sind, ein eingeschaltetes Mobiltelefon mit recht hoher Genauigkeit zu orten und damit Rückschlüsse auf den Aufenthaltsort den Besitzers zu ziehen, wurde nach Bekanntwerden kurz und intensiv diskutiert, ist aber heute in der öffentlichen Diskussion und Wahrnehmung kaum noch präsent.

Dennoch besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen den genannten Beispielen und der Datenerfassung im Smart Grid: Bei vielen Dienstleistungen im Leben hat der Kunde die Möglichkeit, sich für oder gegen eine Nutzung zu entscheiden. Im Fall der Stromversorgung besteht diese Wahlmöglichkeit jedoch nicht, da ein Verzicht auf einen Stromanschluss unrealistisch ist. Aus diesem Grund sind klare Vorgaben anzustreben, in welchem Umfang und Form die erfassten Daten vom Energieversorgungsunternehmen genutzt und weitergegeben werden dürfen. Hier ist sicherlich auch der Gesetzgeber gefordert, einheitliche und bezüglich der Privatsphäre akzeptable Rahmenbedingungen für die Nutzung von Stromanschlüssen vorzugeben.

¹¹<http://www.facebook.com/>

4 Von der Forschung in die Praxis

Die vorhergehenden Kapitel haben gezeigt, dass viele Bausteine, die zur Umsetzung der Vision „Smart Energy“ benötigt werden, technisch bereits verfügbar sind oder zumindest in der Forschung gute Fortschritte gemacht haben. An dieser Stelle sollen nun noch Themen erörtert werden, die für den Übergang von den theoretischen Möglichkeiten in die Praxis von Bedeutung sind.

4.1 Der ökonomische Aspekt des Einsatzes in der Praxis – rentiert sich das?

Eines der wichtigsten Ziele von Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) ist es, ihren Kunden jederzeit zuverlässig und unterbrechungsfrei elektrische Energie zur Verfügung zu stellen und damit finanziell erfolgreich zu sein. Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass die EVU bei jeder technischen Veränderung weg vom erprobten System die potentiellen Risiken genauestens abklären und dem möglichen Nutzen gegenüberstellen. Wie andere marktwirtschaftliche Unternehmen auch nehmen EVU grosse Investitionen nicht nur um der reinen Innovation willens vor, sondern insbesondere dann, wenn der erwartete finanzielle Nutzen oder Imagegewinn durch zuverlässige Modelle und Prognosen als positiv eingeschätzt wird.

Aus der Tatsache, dass weltweit unterdessen einige EVU erste Schritte hin zum Einsatz von Smart Meters machen, wie beispielsweise in Kapitel 1.2 über *ENEL* in Italien und *ewz* in Zürich berichtet, lässt sich schliessen, dass auch von dieser eher konservativen Branche die Chancen des Smart Grid grundsätzlich positiv und als nützliche und ökonomisch sinnvolle Technologie eingestuft werden.

Verschiedene andere Aktivitäten von Firmen, die im Markt rund um die Stromversorgung tätig sind, sprechen ebenfalls dafür, dass die Wirtschaft die Chancen von Smart Energy als gross erachtet. Beispielsweise hat der internationale Konzern ABB, der im Kerngeschäft in der Automation und Energietechnik tätig ist, am 5. Mai 2010 mitgeteilt, dass er die 900 Mitarbeiter zählende amerikanische Softwarefirma Ventyx übernimmt [24]. Ventyx stellt Software für die Bereiche Energiehandel- und Risikomanagement, Energiebetriebsmanagement, Energieanalyse und die Prognose von Strombedarf und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen her. In einem Interview des Tagesanzeiger am gleichen Tag mit Jasmin Staiblin, der Firmenchefin von ABB Schweiz, äussert sich diese zum Thema „schlaue Stromnetze“ zudem mit den Worten „Für den Konzern wird das ein Milliardengeschäft“ [25]. Beide Meldungen zeigen das Zukunftspotential, das ABB diesem Bereich zuspricht.

Schliesslich beweist die gemeinsame Gründung der Gesellschaft „DII Desertec Industrial Initiative“ durch Munich RE, Deutsche Bank, Siemens, ABB, RWE und andere grosse Konzerne und Banken nach einer mehrjährigen Planungsphase, dass unterdessen selbst bei ungewöhnlicheren Ideen im Bereich der Smart Energy die wirtschaftliche Rentabilität plausibel erscheint: Desertec beabsichtigt die Erzeugung von Solar- und Windstrom in Wüstenregionen Afrikas sowie dessen Transport nach Europa. Da dort die durchschnittliche Sonneneinstrahlung pro Flächeneinheit deutlich höher ist als in Europa, lässt sich bereits auf relativ kleinen Flächen ein grosser Teil der in Europa benötigten elektrischen Energie produzieren (siehe Abbildung 7). Allerdings ist in diesem Szenario zu beachten, dass wegen der Durchleitung des Stroms die politische Abhängigkeit von erdölproduzierenden Staaten durch eine neue Abhängigkeit von den nordafrikanischen Ländern ersetzt wird, durch die die künftigen Leitungen führen. Zudem besteht in Europa an vielen Orten das Problem, dass neu zu erstellende Hochspannungsleitungen, wie sie für Projekte wie Desertec nötig wären, auf gesellschaftspolitische Widerstände stossen: Experten identifizieren „zeitaufwändige Genehmigungsverfahren, starke Opposition in den Kommunen und Rechtsstreitigkeiten“ als Haupthindernisse für den Ausbau des Übertragungsnetzes [43]. Dies zeigt, dass nicht immer nur technische Schwierigkeiten, sondern auch Akzeptanzprobleme neue, innovative Lösungen für die Energieversorgung der Zukunft erschweren.



Abbildung 7: Konzept für das Desertec-Projekt (Quelle: „DESERTEC Foundation, www.desertec.org” [6])

4.2 Gesamtheitliche Sicht

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, erscheinen der Einsatz von erneuerbaren Energiequellen bei der Stromproduktion, die Optimierung unseres Umgangs mit elektrischer Energie und daraus resultierend der Umbau des Stromnetzes zum Smart Grid in mehreren Fällen bereits heute aus ökonomischer Sicht als rentabel.

In den letzten Jahren sind beispielsweise Preise von Solarstromanlagen stark gesunken und es wird mit einer weiteren Abnahme der Kosten gerechnet, die durch die Erhöhung der Produktionsmengen verursacht wird [18, 8, 36]. Dadurch kann es sogar sein, dass sich der Einsatz von nachhaltigen Technologien zur Stromproduktion bei einem späteren Einstiegsdatum absolut gesehen sogar bereits früher amortisiert.

Zudem darf bei der Analyse des Nutzens für die Umwelt in der Gesamtsicht die Umweltbelastung bei Herstellung und Transport von Komponenten zum Einsatz im Stromnetz der Zukunft nicht vergessen werden. Die Akkumulatoren in Elektroautos beispielsweise enthalten schädliche Substanzen und auch ihre Herstellung benötigt Energie und belastet die Umwelt.

4.3 Offene Fragen

Selbst wenn bereits viele technische Probleme gelöst sind beziehungsweise die Forschung sich praxistauglichen Ergebnissen nähert, so gibt es dennoch auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Elektrizitätsversorgung in der Realität noch verschiedene offene Fragen.

Beispielsweise ist für den Einsatz von Smart Meters eine *Kommunikationsmöglichkeit* des intelligenten

Stromzählers mit dem betreibenden Elektrizitätsversorgungsunternehmen nötig, damit Informationen vom Zähler zur Zentrale und Steuerbefehle in die umgekehrte Richtung übertragen werden können. Als Medium für die Kommunikation bieten sich verschiedene Technologien an, die in der Literatur beschrieben und bewertet werden [31], wie Datenübertragung via das Stromkabel selbst, über das Telefonnetz, das Fernsehkabelnetz oder mittels Funkverbindungen im Mobilfunknetz oder über proprietäre Technologien.

Keines dieser Kommunikationsmedien erfüllt derzeit alle Anforderungen wie flächendeckende Verfügbarkeit am Installationsort des Stromzählers, Kosteneffizienz oder technologische Langlebigkeit. Gerade letzterer Punkt ist ein wesentlicher Aspekt, da die Stromversorgungsunternehmen die einmal bei den Haushalten eingebauten Stromzähler aus Kostengründen möglichst lange betreiben wollen. Allerdings ist für viele der genannten Kommunikationstechnologien die langfristige Verfügbarkeit unsicher: Selbst bei derzeit sehr verbreiteten Standards wie Mobilfunknetzen nach GSM oder Breitbandanschlüssen auf Basis von ADSL besteht das Risiko, dass in wenigen Jahren die flächendeckende Verfügbarkeit abnimmt, weil diese Technologien durch neue Entwicklungen wie beispielsweise UMTS, LTE oder Glasfaseranschlüsse verdrängt werden. Es ist nachvollziehbar, dass die Stromversorgungsunternehmen eine kürzere technologische Lebensdauer wegen der damit verbundenen erhöhten regelmässigen Kosten für Neubeschaffung und Installation der Stromzähler scheuen.

Die erforderliche *Langlebigkeit* der digitalen Stromzähler sowie anderer Hardware-Komponenten, die die digitale Infrastruktur des Smart Grid bilden, wirft neben der Kommunikation auch softwaretechnische Fragen auf. Ein grosser Nutzen in der Vision des Smart Grid ist, dass es sich gut an sich laufend verändernde Anforderungen anpassen lässt. Da heute noch nicht sehr klar ist, wie das Smart Grid in einigen Jahren aussehen soll, wird von den darin eingebundenen Komponenten und Software-Agenten eine hohe Flexibilität erwartet, damit beispielsweise auf Änderungen in Kommunikationsprotokollen oder in der Art und Weise der netzweiten Kollaboration mittels Softwareanpassungen reagiert werden kann. Nur so kann der Zwang zu einem baldigen Austausch von Teilen der Infrastruktur vermieden und die gewünschte Langlebigkeit sichergestellt werden.

Ein denkbarer Weg, um diese *Flexibilität* zu erreichen, ist sicherlich eine Standardisierung, und zwar nicht nur von Schnittstellen nach aussen, sondern auch diejenige des inneren Aufbaus der Softwareplattform, damit Anpassungen der Anwendungssoftware überall einheitlich vorgenommen werden können. Dies würde auch teilweise die Problematik entschärfen, dass bei langlebigen Komponenten, die Software enthalten, auch über einen sehr grossen Zeitraum aktualisierte Versionen der Software zur Verfügung gestellt werden müssen, insbesondere wenn Sicherheitslücken bekannt werden. Das erfordert nämlich, dass Kenntnisse über die Software und die zur Erstellung gewählte Technologie ebenfalls über diesen Zeitraum verfügbar sein müssen, was wiederum einfacher möglich ist, wenn es sich nur um eine einzige einheitliche Plattform handelt.

Eine wie beschrieben stark erhöhte Flexibilität geht allerdings mit höheren Kosten für die Hardwarekomponenten einher, da diese nicht mehr ausschliesslich für einen einzigen Einsatzzweck optimiert werden können. Höhere Kosten wiederum bremsen die Transformation hin zum Smart Grid. Erste Bestrebungen zu einer Standardisierung sind bereits im Gang [21].

Eine weitere noch nicht zufriedenstellend gelöste Frage ist, wie das Thema der *Informationssicherheit*, das oben im Kontext der Softwareaktualisierung sowie in Abschnitt 3.3 angesprochen wurde, besser in den Entwicklungsprozess eingebunden werden kann. Wie lässt sich also erreichen, dass die im Smart Grid eingesetzte Software hohe Ansprüche betreffend der Sicherheit erfüllen kann? Die Antwort dafür geht sicherlich zum einen in die Richtung, dass Sicherheitsaspekten im Engineering-Prozess ein höheres Gewicht beigemessen wird, beispielsweise durch entsprechende Ausbildung und Förderung des Sicherheitsbewusstseins der an der Entwicklung beteiligten Mitarbeiter oder geeignete Review-Prozesse. Da aber diese Massnahmen einen höheren zeitlichen und finanziellen Entwicklungsaufwand zur Fol-

ge haben, ist zu befürchten, dass einzelne Hersteller genau an dieser Stelle gefährliche Einsparungen vornehmen könnten. Um einem solchen Verhalten entgegenzuwirken, wäre es denkbar, den Bereich der Softwareerstellung für das Smart Grid stärker zu regulieren, so wie dies beispielsweise in der Zivilluftfahrt und der Pharmaindustrie bereits heute der Fall ist.

4.4 Der Beitrag der Informatik

Viele der im vorliegenden Bericht beschriebenen Massnahmen sind Mosaiksteine für das Gesamtbild der „Smart Energy“. Teilweise erscheint es auch, dass sie – einzeln betrachtet – nur kleine Verbesserungen ermöglichen könnten.

Dennoch ist die Menschheit bei der Lösung der Frage nach der Stromversorgung der Zukunft ganz essentiell auf die Informations- und Kommunikationstechnologien angewiesen, da nur diese die zwingend benötigten Methoden zur Optimierung und Flexibilisierung von Stromproduktion, -übertragung und -verbrauch bereitstellen können.

Gerade Fachleute der Informatik besitzen daher eine grosse Verantwortung der Gesellschaft gegenüber, bei diesem Thema, das für heutige und zukünftige Generationen von hoher Wichtigkeit ist, alles zu leisten, was in ihren Möglichkeiten steht.

In diesem Sinne sind auch hier die Ethik-Richtlinien der Association for Computing Machinery (ACM), die in mehreren Punkten die Verantwortung bei der Ausübung unserer beruflichen und nichtberuflichen Tätigkeiten beschreiben, von Bedeutung [2]:

Als ACM Mitglied...

- 1.1 ... verpflichte ich mich, meinen Beitrag zur Gesellschaft und zum menschlichen Wohlergehen zu leisten.
- 2.1 ... strebe ich nach der grössten Qualität, Leistungsfähigkeit und Würde bei der Durchführung und in den Ergebnissen meiner beruflichen Arbeit.
- 2.7 ... fördere ich das Verständnis der Öffentlichkeit über Informatik und ihre Folgen.

Ähnliche ethische Leitlinien geben auch andere Fachorganisationen wie das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) oder die Gesellschaft für Informatik (GI) vor [4].

5 Fazit

Auf dem Weg zu einem intelligenteren Umgang mit elektrischer Energie existieren heute für viele der technischen Herausforderungen bereits Lösungen oder werden wichtige Lösungsansätze erforscht. Daneben gibt es aber auch für eine Reihe von praxisrelevanten Fragestellungen noch keine erprobten Antworten. Bei der Beurteilung der Machbarkeit gibt es zudem nicht nur technische Probleme zu lösen, sondern auch die gesellschaftliche Akzeptanz und der politische Wille für eine tiefgreifende Veränderung im Stromnetz sind wichtige Themen.

Dies führt dazu, dass zwar bereits erste vielversprechende Schritte hin zur „Smart Energy“ unternommen wurden, wir aber heute von einer kompletten Umsetzung der angedachten Konzepte und zukünftigen Optimierungsmöglichkeiten noch weit entfernt sind.

Insgesamt kann man aber das bislang Erreichte in soweit sehr zuversichtlich stimmen, als dass sich durch zielgerichteten und koordinierten Einsatz aller gesellschaftlicher Gruppen die anspruchsvollen Aufgaben im Hinblick auf die Stromversorgung der Zukunft mutig anpacken und lösen lassen sollten. Dabei muss die Informatik aufgrund ihrer Stellung, die neue Technologien und innovative Lösungswege ermöglicht, eine Schlüsselrolle einnehmen.

Literatur

- [1] Bundesgesetz über den Datenschutz. Schweizerische Eidgenossenschaft.
http://www.admin.ch/ch/d/sr/c235_1.html.
- [2] Code of Ethics. Association for Computing Machinery.
<http://www.acm.org/about/code-of-ethics>.
- [3] Definition Kritische Infrastrukturen. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik.
https://www.bsi.bund.de/cln_165/sid_9A6129503E8626B319294D0312F4D99C/ContentBSI/Themen/Kritis/Einfuehrung/KritisDefinitionen/definitionen.html.
- [4] Ethische Leitlinien. Gesellschaft für Informatik e.V. <http://www.gi-ev.de/wir-ueber-uns/unsere-grundsaeetze/ethische-leitlinien/>.
- [5] Faktenblatt Juni 2009. Nuklearforum Schweiz, Bern.
www.nuklearforum.ch/_upl/files/Faktenblatt_Strommix_d.pdf.
- [6] Konzeptabbildung DESERTEC-EUMENA. DESERTEC Foundation. http://www.desertec.org/fileadmin/downloads/press/desertec_map_medium.zip.
- [7] Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Studie von McKinsey & Company, Inc. http://www.mckinsey.de/downloads/presse/2007/070925_Kosten_und_Potenziale_der_Vermeidung_von_Treibhausgasemissionen_in_Deutschland.pdf.
- [8] Photovoltaik-Kosten. Bund der Energieverbraucher.
http://www.energieverbraucher.de/de/Erneuerbare/Sonnenstrom/Kostenentwicklung_410/ContentDetail_601/.
- [9] Requirements Engineering I: Nicht-funktionale Anforderungen. Universität Zürich. Institut für Informatik. http://www.ifi.uzh.ch/reqrg/fileadmin/downloads/teaching/courses/requirements_engineering_I_ws0607/Kapitel_11_NFAnf.pdf.
- [10] Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, L140/16.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:DE:PDF>.
- [11] Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2008. Bundesamt für Energie, CH-3063 Ittigen.
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_75107823.pdf.
- [12] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2008. Bundesamt für Energie, CH-3063 Ittigen.
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_893380831.pdf.
- [13] Swissgrid Medienressourcen. Swissgrid AG, Frick.
<http://www.swissgrid.ch/media/resources/>.

- [14] **Swissgrid Unternehmenspräsentation.** Swissgrid AG, Frick.
http://www.swissgrid.ch/media/resources/presentations/list/S091023_swissgrid_company_presentation.pdf/de.
- [15] **Ubiquitous Computing.** Deutsche Wikipedia.
http://de.wikipedia.org/wiki/Ubiquitous_Computing.
- [16] **Enel: Italy reaping first-mover benefits of smart meters.** EurActiv Network, 03. Februar 2010.
<http://www.euractiv.com/en/print/italy-reaping-first-mover-benefits-smart-meters-enel>.
- [17] **Kampf dem „Flash Crash“.** Tagesanzeiger Online, 10. Mai 2010. <http://www.tagesanzeiger.ch/wirtschaft/unternehmen-und-konjunktur/Kampf-dem-Flash-Crash/story/29902507/print.html>.
- [18] **Sonne wird billiger.** Bund der Energieverbraucher, 11. Dezember 2008.
http://www.energieverbraucher.de/de/Erneuerbare/Sonnenstrom/Kostenentwicklung_410/ContentDetail_7560/.
- [19] **European Technology Platform – SmartGrids: Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future.** Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2006.
ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids_en.pdf.
- [20] **ewz.powerquality. Das Netzqualitätssystem von ewz.** Elektrizitätswerk der Stadt Zürich ewz, Netzdienstleistungen, 2009. <http://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/ewz/Deutsch/Netzdienstleistungen/Publikationen%20und%20Broschueren/NDL.Folder.Netzqualiaet.pdf>.
- [21] **NISTIR 7628: Smart Grid Cyber Security Strategy and Requirements.** NIST National Institute of Standards and Technology, Februar 2010. http://csrc.nist.gov/publications/drafts/nistir-7628/draft-nistir-7628_2nd-public-draft.pdf.
- [22] **Schneller, häufiger und bequemer mit der Bahn trotz zunehmenden Kapazitätsengpässen.** SBB Medienmitteilung zum Fahrplan 2009, 21. November 2008.
http://mct.sbb.ch/mct/konzern_dienstleistungen/konzern_medien.htm?cmd=491EA49BA641A2E7D650E112FFEDAC21.
- [23] **Stromausfall SBB. Hergang und Behebung der Störung.** SBB Infrastruktur Energie, 23. Juni 2005. http://mct.sbb.ch/mct/050623_stromausfall_medienkonferenz.pdf.
- [24] **ABB mit Milliardenübernahme: Der Elektrotechnikkonzern kauft die amerikanische Softwarefirma Ventyx - um sich so im Energiegeschäft zu verstärken.** Tagesanzeiger Online, 5. Mai 2010. <http://www.tagesanzeiger.ch/wirtschaft/unternehmen-und-konjunktur/ABB-mit-Milliardenuebernahme-/story/19625401/print.html>.
- [25] **„Ich finde Technik hip und cool“.** Tagesanzeiger Online, 5. Mai 2010. <http://www.tagesanzeiger.ch/wirtschaft/unternehmen-und-konjunktur/Ich-finde-Technik-hip-und-cool/story/10352884/print.html>.
- [26] **Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers.** IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Nov. 2007.
http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf.

- [27] F. Aggeler. Überwachung des Energieverbrauchs auf Geräteebene: verteilte und hybride Lösungen. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [28] D. Blunschy. Smart Buildings. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [29] C. Bricalli. Das Web auf dem Smart Meter: IPv6, REST und andere technologische Grundlagen. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [30] M. Bruggmann. Smartgrid: Der Weg zum intelligenten Stromnetz. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [31] G. Deconinck. Metering, Intelligent Enough for Smart Grids? *Securing Electricity Supply in the Cyber Age*, pages 143–157, 2010.
- [32] F. Dreier. Elektroautos und ihre Rolle im Stromnetz. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [33] P.-A. Graf. Präsentation zu Swissgrid Control. Swissgrid AG, Frick.
http://www.swissgrid.ch/media/resources/presentations/list/M01_S100119_swissgrid-control_slides_graf.pdf/de.
- [34] M. Gschwend. Monitoring energy usage on device level: centralized solutions. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [35] M. Hartmeier. Smart Metering: Hintergrund und Stand der Technik. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [36] R. Haselhuhn. *Photovoltaik: Gebäude liefern Strom*. Beuth, Januar 2010.
- [37] B. Hürlimann. Das Stromnetz fängt zu plaudern an. *Neue Zürcher Zeitung NZZ Online*, 21. April 2010. http://www.nzz.ch/nachrichten/zuerich/datenschutz_kanton_zuerich_stromzaehler_smart_meters_1.5496115.html.
- [38] F. Mattern. Ubiquitous Computing. Lectures for the Master’s Programme in Computer Science at ETH Zurich, Spring Semester 2010. <http://www.vs.inf.ethz.ch/edu/uc/>.
- [39] F. Mattern, T. Staake, and M. Weiss. ICT for Green – How Computers Can Help Us to Conserve Energy. In *Proceedings of e-Energy 2010*, Passau, Germany, Apr. 2010.
- [40] D. H. Meadows and Club of Rome. *The limits of growth; a report for the Club of Rome’s project on the predicament of mankind*. New York, Universe Books, 1972.
- [41] K. Moslehi and R. Kumar. Smart Grid – A Reliability Perspective. 2010.
- [42] D. Oeding and B. R. Oswald. *Elektrische Kraftwerke und Netze*. Springer, 2004.
- [43] Oliver Lönker. Ein Stromnetz für Europa. *Neue Energie – das Magazin für erneuerbare Energien*, 12/2006. <http://www.neueenergie.net/index.php?id=1355>.
- [44] S. Pflugi. Nachhaltige Mobilität. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [45] M. Pipattanasomporn, H. Feroze, and S. Rahman. Multi-Agent Systems in a Distributed Smart Grid: Design and Implementation. *Proceedings of the IEEE Power Systems Conference and Exposition (PSCE 2009)*, Seattle, WA USA, March 2009.

- [46] E. L. Quinn. Smart Metering & Privacy: Existing Law and Competing Policies. Report for the Colorado Public Utilities Commission, 2009.
<http://www.dora.state.co.us/puc/DocketsDecisions/DocketFilings/09I-593EG/09I-593EG-Spring2009Report-SmartGridPrivacy.pdf>.
- [47] P. Senti. Distributed Energy Production: Drivers, Challenges and Opportunities. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [48] R. Tawil. Aspekte der Sicherheit und Privatsphäre im zukünftigen Stromnetz. Bericht im Rahmen des Seminars „Smart Energy“ an der ETH Zürich im FS2010.
- [49] The Climate Group. SMART 2020: Enabling the Low Carbon Economy in the Information Age.
http://www.smart2020.org/_assets/files/01_Smart2020ReportSummary.pdf, 2008.
- [50] The Climate Group. SMART 2020: Frequently Asked Questions, What Is “SMART”.
<http://www.smart2020.org/faqs/>, 2009.
- [51] Wolfgang Müller. Energie: Die stärksten Kraftwerke der Welt. Focus online, 09. Oktober 2008.
http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/technik/tid-12079/energie-die-staerksten-kraftwerke-der-welt_aid.337780.html.
- [52] G. Wood and M. Newborough. Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: environment, behaviour and design. *Energy and Buildings*, 35:821–841, 2003.
linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778802002414.