

Smartgrid

Der Weg zum intelligenten Stromnetz

Marc Bruggmann

Departement für Informatik, ETH Zürich

marcbr@ethz.ch

Zusammenfassung

Die effektive Übertragung und Versorgung mit Elektrizität ist eine Grundvoraussetzung für Staaten, Wirtschaftssysteme und Bürger in der modernen Gesellschaft. Die Verfügbarkeit von neuen Technologien zur Produktion, Speicherung, Überwachung und Verteilung von Energie ermöglicht heute eine tiefgreifende Erneuerung des bestehenden Stromnetzes. Diese Entwicklung führt zu einem verteilten System von weitgehend autonom operierenden, vernetzten, intelligenten Knoten: dem Smartgrid.

Dieser Bericht gibt eine Übersicht über die bestehenden Netze, die Vision des Smartgrids und eine mögliche Implementierung basierend auf einem Multiagentensystem.

1 Einführung

Eine zuverlässige Stromversorgung ist eine entscheidende Grundlage für die moderne Gesellschaft. Hohe Auslastung und geringe Flexibilität drohen jedoch das aktuelle System zu überlasten. Zusätzlich wächst die Erwartung nach Stabilität und Betriebssicherheit. In Europa wird die Nachfrage nach Elektrizität bis ins Jahr 2030 jährlich um 1.4% steigen [5]. All diese Anforderungen stellen das europäische Stromnetz vor Herausforderungen, für die es nicht gebaut wurde.

Neben dem primären Wunsch nach einer sicheren Versorgung kommt die Motivation für die zukünftigen Netze aus neuen Energiequellen. Fossile Brennstoffe drohen nicht nur auszugehen, sondern tragen mit ihren Emissionen auch zum Klimawandel bei, dessen Bewältigung zu den grössten Aufgaben der Menschheit in diesem Jahrhundert gehören wird. Die effiziente Nutzung neuer Energiequellen, wie zum Beispiel Windenergie, Solarkraft oder Geothermie, führen zu einem heterogenen Netz mit vielen kleineren Teilnehmern [10].

Eine Erneuerung der Infrastruktur scheint also unumgänglich. Gleichzeitig soll das Netz intelligenter gemacht werden. Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnologie (ICT) ermöglichen es, Prozesse im Stromnetz zu automatisieren und die traditionell zentrale Steuerung durch ein verteiltes System zu ersetzen, welches als Smartgrid bezeichnet wird. Basierend auf weitgehend autonom agierenden, stark vernetzten Knoten bietet das Smartgrid die Möglichkeit, ein zukunftsfähiges Stromnetz auf eine neue Art zu verwalten.

Dieser Bericht schildert in Kapitel 2 die Vision für ein zukünftiges Stromnetz in Europa. Kapitel 3 beschreibt die technischen Grundlagen für ein intelligentes Stromnetz, während Kapitel 4 auf eine mögliche Implementierung zur verteilten Steuerung eines solchen Netzes eingeht.

2 Die Erneuerung des europäischen Stromnetzes

Das heutige Stromnetz wurde gebaut, um die klassische Stromversorgung der Bevölkerungszentren zu ermöglichen, also als gerichtete Verbindung von grossen Kraftwerken zu den Verbrauchern. Die Übertragung von Elektrizität ist meist staatlich oder von einem monopolistischen Anbieter kontrolliert und orientiert sich im Aufbau an der regionalen Verteilung von den Kraftwerken hin zu den Endkunden.

Der Wunsch nach umweltfreundlicher Stromproduktion zusammen mit innovativen Technologien und weiteren Veränderungen auf der Anbieterseite ermöglichen es den Kunden heute, sich immer aktiver am Stromnetz zu beteiligen. Dies erfordert neue, auf den Kunden ausgerichtete Netze und Kontrollmechanismen.

Da die Erneuerung des Stromnetzes grossen regionalen und wirtschaftlichen Einflüssen gerecht werden muss, beschränkt sich dieses Kapitel auf die Situation in Europa. Die hier geschilderte Vision orientiert sich stark an dem Bericht der European Smartgrids Technology Platform (ESTP) [5].

2.1 Anforderungen

Das bestehende Stromnetz ist den heutigen Anforderungen immer weniger gewachsen. Es basiert zu grossen Teilen auf der Gewinnung von Energie aus fossilen Rohstoffen, deren Reserven sich langsam erschöpfen. Gleichzeitig steigt der Energiebedarf weiter und bringt das Netz so an die Kapazitätsgrenze.

Die alternde Infrastruktur zwingt die Anbieter, ihre Netze zu erneuern. Die weltweit nötigen Investitionen werden auf 16 Billionen Dollar geschätzt, davon alleine 500 Milliarden Dollar in Europa [5]. Daher ist die Kosten-Effizienz ein entscheidender Faktor. Parallel dazu sollen die Unterhaltskosten durch flexiblere automatische Steuerungssysteme vermindert werden.

Industrie, Wirtschaft und Gesellschaft sind mittlerweile extrem abhängig von einer stabilen Stromversorgung. So sind verschiedene kritische Infrastruktureinrichtungen wie das Internet, das Telefonnetz, Verkehrsleitsysteme oder die Bahn ohne Stromversorgung nicht funktionsfähig. Gleichzeitig steigt die Anforderung an die Kapazität des Netzes. Neue Stromquellen müssen erschlossen werden, um den erhöhten Bedarf an Energie zu decken. Um die Versorgung zu sichern, müssen der Transport und die Zwischenspeicherung verbessert werden. Dies erfordert auch eine bessere internationale Kooperation, welche die Fehlertoleranz und Anpassungsfähigkeit für die verschiedenen Anbieter erhöht.

Auf der Kundenseite zeigt sich der Wunsch nach einer intensiveren Beteiligung am Energiesystem. Immer öfter werden auf Dächern von Privathäusern, aber auch von KMU¹ und ganzen Industriekomplexen Solarzellen installiert [10]. Aus dieser und aus anderen Quellen gewonnener Strom soll zurück ins Netz eingespeist werden können.

Da die Auswahl an Stromlieferanten steigen wird, wird auch eine grössere Flexibilität bei der Anbieterwahl verlangt. So soll zum Beispiel zu verschiedenen Zeiten, abhängig von Preis und anderen Faktoren, ein bestimmter Stromanbieter gewählt werden können. Dies verlangt auch die Liberalisierung der Strommärkte durch die Politik.

Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Nachhaltigkeit. In Zukunft wird das Verlangen nach sauberer, nachhaltiger Energieproduktion wachsen. Internationale Abkommen wie zum Beispiel das Kyoto-Protokoll oder das Übereinkommen von Kopenhagen verpflichten die Staaten, ihren CO₂-Ausstoss zu senken. Die Energie-

¹Kleine und mittlere Unternehmen

produktion spielt dabei eine tragende Rolle. Kraftwerke für erneuerbare Energien, zum Beispiel Windkraft oder Geothermie, haben typischerweise andere Anforderungen an das Stromnetz. So ist beispielsweise die Stromproduktion eines Windkraftwerks nicht kontinuierlich, sondern abhängig von den momentanen Wetterbedingungen. Viele kleinere Kraftwerke mit geringerer und schwankender Produktion führen zu einem dezentralen heterogenen System (Abbildung 1).

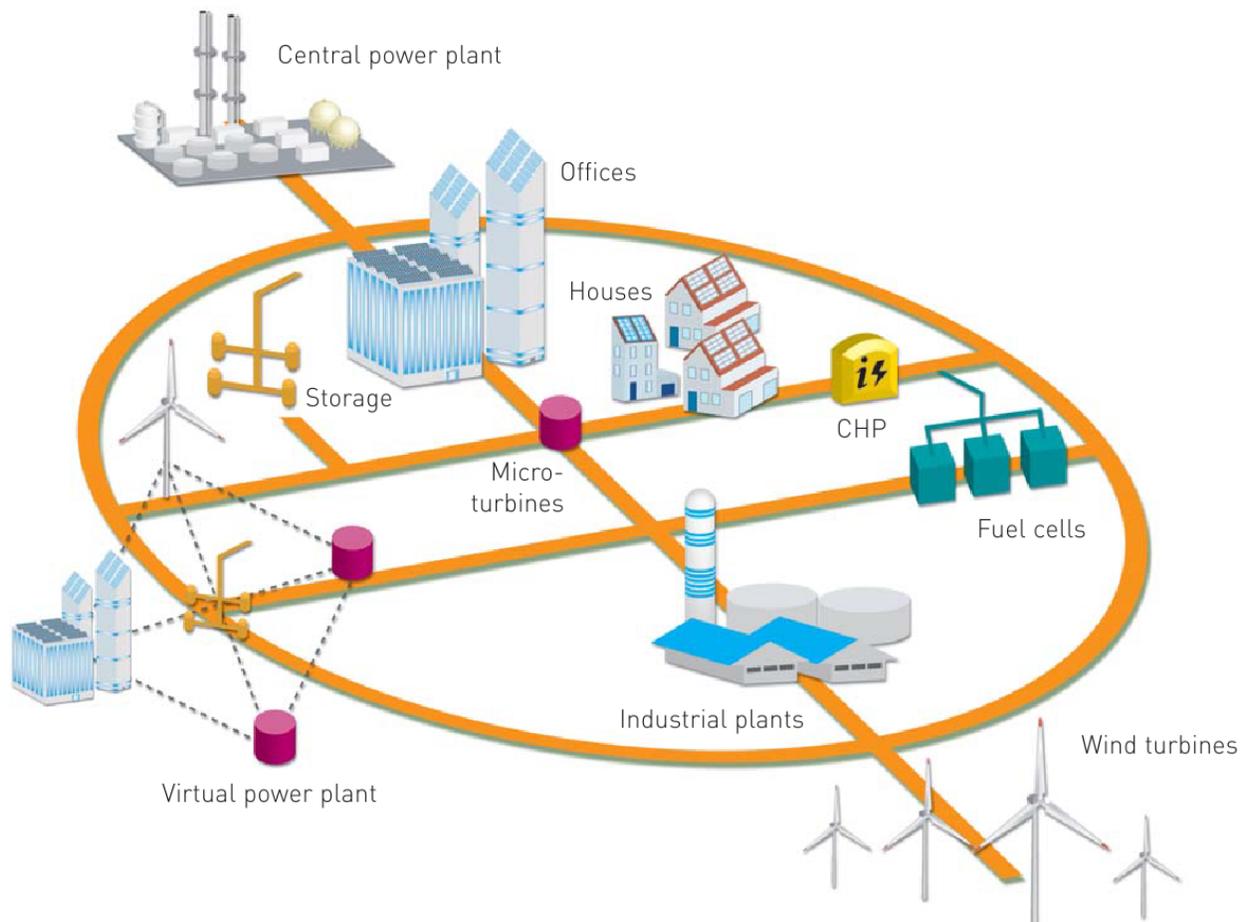


Abbildung 1: Das zukünftige Stromnetz als dezentrales System. [5]

2.2 Vision für die Zukunft

Die ESTP legt in ihrer Vision des zukünftigen Stromnetzes auf vier Hauptpunkte Wert [5]:

- *Flexibilität*: Das Stromnetz der Zukunft soll sowohl für Anbieter wie auch für Endkunden möglichst flexibel sein. Kunden sollen aus mehreren Anbietern wählen können. Stromproduzenten sollen einfach auf Veränderungen und Probleme reagieren können.
- *Einheitlicher Zugang*: Alle Benutzer sollen einen einheitlichen Zugang zum System haben, vor allem für kleinere lokale Stromproduzenten oder Kraftwerke mit erneuerbaren Energiequellen.

- *Zuverlässigkeit*: Die Qualität und Sicherheit des Stromnetzes soll jederzeit garantiert sein, auch im Fall von unvorhergesehenen Problemen im Netz.
- *Wirtschaftlichkeit*: Es soll ein gesundes ökonomisches Umfeld geschaffen werden, das Innovation und Effizienz im Energie-Sektor fördert.

Um diese Vision Wirklichkeit werden zu lassen, müssen verschiedene Interessengruppen in den Prozess der Umsetzung einbezogen werden. Nebst den schon erwähnten Kunden und Stromproduzenten sind dies vor allem Forschung und Technologielieferanten sowie Regierungen und öffentliche Ämter. Im Hinblick auf die Technologie ist es wichtig, eine klare Strategie festzulegen, um langfristige Investitionen zu sichern. Aufgabe der öffentlichen Hand wird es sein, die soziale Verantwortung und Nachhaltigkeit im Energiesektor zu fördern und so dem Tiefpreisdruck entgegenzuwirken.

Der Übergang zu diesen neuen Technologien muss langfristig geplant werden. Ein wichtiger Schritt ist die Harmonisierung der europäischen Strommärkte und die Etablierung von offenen technischen Standards und Protokollen. Dies ermöglicht eine Unabhängigkeit von bestimmten Staaten oder bestimmten Technologie-Lieferanten. Da auch in der Übergangsphase keine Ausfälle geduldet werden können, braucht es stabile Zwischenlösungen, die eine schrittweise Migration der bestehenden Netze erlauben.

3 Smartgrid: Das intelligente Stromnetz

Wie kann man das Stromnetz intelligenter machen? Heutige Leitsysteme basieren auf dem SCADA² Prinzip, also einer zentralen Kontrollstelle. Einige Prozesse werden von Computern überwacht, aber in Notfällen wird teilweise immer noch per Telefon zwischen verschiedenen Kontrollstellen kommuniziert [4].

Das Internet liefert die Anregung für die Struktur des Smartgrids: Ein selbstorganisierendes System von aktiven Knoten, die verteilt Entscheidungen treffen können. Neben den Medien zur Energieübertragung verbinden moderne Kommunikationstechnologien die verschiedenen Komponenten und erlauben die Steuerung des gesamten Netzwerks, zum Beispiel um die Auslastung besser zu verteilen oder Ausfälle von Hochspannungsleitungen zu kompensieren. Im Gegensatz zum traditionellen Netz fließt Energie nicht nur von Kraftwerken zu den Endkunden, sondern in alle Richtungen.

Um dies zu ermöglichen, muss die Infrastruktur auf allen Stufen angepasst und verbessert werden. Neue Protokolle und Standards regeln das Zusammenspiel der verschiedenen Akteure. Auch Endkunden übernehmen eine wichtigere Rolle als heute, indem sie sich aktiv am Netz beteiligen. Dies erfordert eine neue Art von Echtzeitinformation und Kommunikation zwischen Kunden und Anbietern. Die verfügbaren Informationen, unter anderem die momentane Netzauslastung oder der aktuelle Preis, ermöglichen intelligente Entscheidungen beim Stromkonsum, so dass zum Beispiel die Waschmaschine zur richtigen Zeit gestartet werden kann.

Die Hauptvorteile von Smartgrids liegen in ihrer Flexibilität und Effizienz. Der Austausch zwischen verschiedenen Regionen mit unterschiedlichen Arten der Stromproduktion geschieht automatisch, so dass die Auslastung besser verteilt werden kann. Kraftwerke und lokale Generatoren passen die Stromproduktion der momentanen Netzauslastung an.

3.1 Intelligente Knoten

Jeder Knoten im Smartgrid agiert als eine unabhängige Einheit, die durch eine Breitbandverbindung mit benachbarten Knoten kommuniziert. Lokale Sensoren überwachen den Betriebszustand und werden vom Betriebssystem ausgewertet, so dass die Kontrollstelle nur im Notfall benachrichtigt werden muss. Neu hinzugefügte Knoten integrieren sich selbständig im bestehenden Netz und erlauben so eine flexible und unkomplizierte Erweiterung des Netzes um neue Komponenten. Ein solcher Knoten kann verschiedenste Komponenten repräsentieren, von Privathaushalten bis zu Kraftwerken.

3.2 Microgrids

Um die Komplexität des Smartgrids zu begrenzen, ist es sinnvoll, verschiedene Knoten zu dynamischen Zellen (Microgrids) zusammenzufassen und dadurch das System hierarchisch zu organisieren. Ein Microgrid ist ein Niederspannungsnetz aus mehreren Stromgeneratoren (z.B. Solarzellen, Erdwärme), Energiespeichern und Konsumenten (Abbildung 2). Die benötigte Kapazität ist typischerweise relativ klein.

Obwohl Microgrids mit dem Hauptstromnetz verbunden sind, ist es im Ausnahmefall möglich, sich komplett davon zu trennen und den Bedarf mit lokalen Generatoren zu decken. Microgrids können gegen aussen

²Supervisory control and data acquisition: ein zentrales System zur Überwachung und Steuerung technischer Prozesse

sowohl als Stromkonsumenten wie auch als Lieferanten auftreten. Dies vereinfacht die Organisation des Smartgrids, da Microgrids als eine einzige kontrollierte Einheit angesehen werden können.

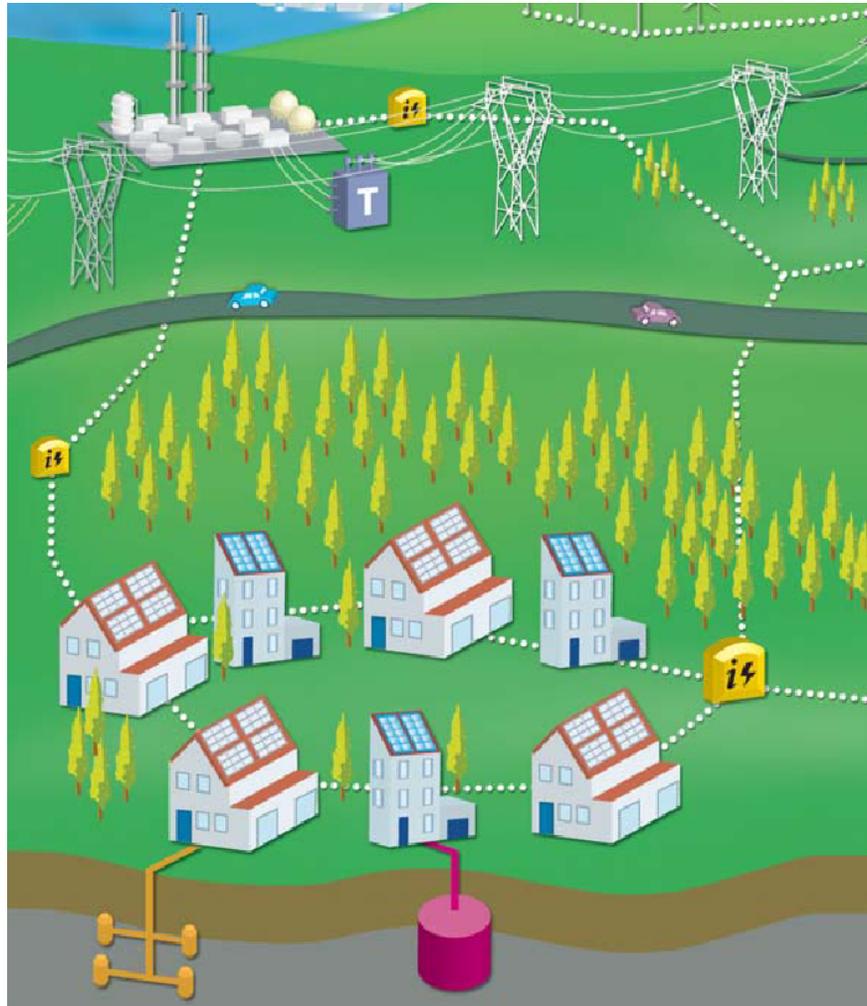


Abbildung 2: Beispiel für ein Microgrid. [5]

Die Organisation als Microgrids erfordert auch Anpassungen auf dem Strommarkt. “Virtual utilities” ist ein am Internet angelehntes Strommarkt-Modell, das die veränderten Strukturen widerspiegelt. Elektrizität wird von Exchange-Agents³ gekauft und wieder verkauft. Kunden und Stromlieferanten verhandeln nicht direkt miteinander, sondern über diese Exchange-Agents. Die gezielte Anwendung von ICT ermöglicht dabei das benötigte dynamische Management und die laufende Anpassung des Netzes an die momentanen Anforderungen.

³bekannte Knoten im Stromnetz, die mit Elektrizität handeln

4 Implementierung als Multiagentensystem

Um ein Smartgrid zu steuern, reicht eine zentrale Kontrolle nicht mehr aus. Verteilte Algorithmen bringen die Skalierbarkeit, die es braucht, um die grosse Zahl an Komponenten im Smartgrid zu steuern. Wenn man das heutige Stromnetz betrachtet, geht die Anzahl an voraussichtlich benötigten Komponenten schnell in die Millionen [6].

Verschiedene neue Forschungsarbeiten schlagen ein Multiagentensystem (MAS) zur Steuerung des Smartgrids vor [9, 11, 7, 3, 8]. Ein solches System ist eine Kombination von mehreren Agenten, die im Kollektiv ein bestimmtes Ziel erreichen wollen. Dabei ist ein Agent ein hardware- oder softwarebasiertes Computersystem mit den folgenden Eigenschaften [12]:

- *Unabhängigkeit*: Ein Agent agiert unabhängig von direkter menschlicher Interaktion und kontrolliert seinen internen Status und seine Aktionen.
- *Interaktion*: Ein Agent kommuniziert mit anderen Agenten über eine standardisierte Schnittstelle.
- *Reaktion*: Ein Agent beobachtet seine Umgebung, zum Beispiel andere Agenten, das Internet oder angeschlossene Sensoren, und reagiert auf Änderungen.
- *Eigeninitiative*: Agenten reagieren nicht nur auf ihre Umgebung, sondern lösen auch selbst Aktionen aus, um festgelegte Ziele zu erreichen.

Ein Agent ist also ein in sich abgeschlossener, gleichzeitig in seinem Umfeld agierender Prozess mit eigenem Zustand, der mit anderen Prozessen über Nachrichten kommunizieren kann.

4.1 Eine konkrete Problemstellung

Zur Veranschaulichung wollen wir eine konkrete Problemstellung betrachten. Kritische Infrastruktur, zum Beispiel in einem Spital, soll unterbrechungsfrei mit Strom versorgt werden. Dazu werden im traditionellen Stromnetz Generatoren eingesetzt, die bei einem Stromausfall die Stromversorgung übernehmen. In diesem Fall wird ein bestimmter Teil des Netzes abgetrennt und mit hauseigenen Mitteln versorgt. Dies ist ein hardwarebasiertes Zonen-Schutzsystem.

Wir betrachten dieses System nun als ein Microgrid. Der Einsatz eines MAS bringt in diesem Fall den Vorteil, dass die Grenzen der geschützten Zone dynamisch festgelegt werden können. So ist es zum Beispiel einfach möglich, neue Generatoren⁴ oder neue Verbraucher ohne grossen Mehraufwand in das System zu integrieren. Ausserdem passen sich Verbraucher automatisch der verfügbaren Kapazität an. Dies führt dazu, dass der Stromverbrauch und die Stromproduktion nicht nur im Notfall, sondern auch im normalen Betrieb optimiert werden.

4.2 Spezifikation der Agenten

Die Idee eines MAS ist es, ein komplexes System in kleinere, einfachere Teilprobleme zu zerlegen. Eine in der Literatur vorgeschlagene Architektur zur Steuerung eines Microgrids basiert auf folgenden Agenten [9]:

⁴zum Beispiel Solarzellen auf dem Dach

- Der *Kontroll-Agent* überwacht Spannung und Frequenz im Netz und erkennt so Ausfälle oder andere Probleme mit der Stromversorgung. In diesem Fall trennt er das Microgrid vom Netz und informiert die anderen Agenten. Ausserdem ist er der Ansprechpartner für die Kommunikation nach aussen und publiziert Informationen wie den aktuellen Strompreis an die Verbraucher.
- Der *Generator-Agent* repräsentiert eine Stromquelle. Er regelt die Stromproduktion abhängig vom Energiebedarf im Microgrid und stellt Angaben wie die maximale Kapazität oder den Verkaufspreis für Strom zur Verfügung.
- Der *Verbraucher-Agent* verwaltet den Energieverbrauch von verschiedenen kritischen oder nicht-kritischen Komponenten. Er erlaubt es dem Benutzer, durch Regeln und Prioritäten den Stromverbrauch dem aktuellen Status des Systems anzupassen.
- Der *Datenbank-Agent* speichert Systeminformationen und gilt als bekannte Anlaufstelle für andere Agenten.

4.3 Implementierung und Tests

Als Grundlage zur Implementierung eines MAS gibt es mehrere frei verfügbare Plattformen, zum Beispiel das auf Java basierende Zeus-Framework [2]. Es implementiert den Fipa-Standard für Multiagentensysteme⁵ und bleibt so kompatibel und einfach erweiterbar. Aufbauend auf diesem Framework wurden die verschiedenen Agenten realisiert [9].

Um die Funktionalität des Systems zu testen, wurde ein Microgrid in Matlab simuliert. Die Agenten laufen auf einem anderen Rechner und beobachten und steuern das Microgrid. In dieser Simulation reagieren die Agenten korrekt auf einen Spannungsabfall im Hauptnetz, indem sie das Microgrid vom Hauptnetz trennen, die lokale Stromproduktion erhöhen und nicht-kritische Verbraucher abschalten, um die verminderte Kapazität auszugleichen [9].

Dies zeigt, dass für diese Problemstellung ein MAS die Aufgabe der Netzsteuerung übernehmen kann. Allerdings beschränkt sich dieser Test auf ein einzelnes isoliertes Microgrid und basiert nur auf einer Simulation. Es bleibt zu zeigen, dass MAS auch wirklich im grossen Rahmen eingesetzt werden können. Dies erfordert neben vertiefter Forschung im MAS-Bereich vor allem auch Pilotprojekte, basierend auf richtigen Komponenten, und schliesslich grossflächige Anpassungen am Stromnetz.

⁵Foundation for Intelligent Physical Agents: Spezifikationen und Kommunikationsprotokolle zur Zusammenarbeit in MAS [1]

5 Schlussfolgerungen

Neue Anforderungen werden in den nächsten Jahrzehnten die Erneuerung des Stromnetzes prägen. Die Integration von erneuerbaren Energiequellen, intelligente Verbraucher und ein immer besser vernetzter internationaler Strommarkt bieten sowohl Chancen als auch Risiken.

Smartgrids sind momentan das bevorzugte Modell, um das Stromnetz der Zukunft zu organisieren. Ein verteiltes System, konzeptuell angelehnt an die dezentrale Organisation des Internets, bringt die gewünschte Flexibilität und Effizienz. Ein bis jetzt ungelöstes Problem ist jedoch eine einheitliche, schrittweise Umsetzung dieser Vision. Ohne ein breit abgestütztes, langfristig geplantes Vorgehen wird es schwierig, die Anforderungen von verschiedenen Interessengruppen zu einem allgemein tragbaren Kompromiss zu vereinen.

Zur Implementation des Smartgrids bieten sich Multiagentensysteme an. Die autonome, pro-aktive Natur von Agenten erfüllt die Voraussetzungen des Smartgrids, Intelligenz auf verschiedene Knoten zu verteilen und kollektive Entscheidungen zu treffen. Sie führen im kleinen Rahmen schnell zu Erfolgen, und die Komplexität des Problems kann gut aufgeteilt werden.

Die Umsetzung im realen Stromnetz wird jedoch sehr viel anspruchsvoller. Stabilität ist in diesem Bereich unumgänglich, und die Auswirkungen eines grossflächigen Wandels zu automatisierten Systemen sind schwierig vorauszusagen. Das ist aber keine unlösbare Aufgabe – die Wichtigkeit ist allen Beteiligten klar und wird so den Fortschritt konstant vorantreiben.

Literatur

- [1] IEEE Foundation for Intelligent Physical Agents [Online]. <http://www.fipa.org>, February 2010.
- [2] Zeus agent development toolkit [Online]. <http://labs.bt.com/projects/agents/zeus>, February 2010.
- [3] A. Dimeas and N.D Hatziargyriou. Operation of a multiagent system for microgrid control, August 2005.
- [4] S. M. Amin and B. F. Wollenberg. Toward a Smart Grid: Power Delivery for the 21st Century. *IEEE Power & Energy Magazine*, Vol. 3, September/October 2005.
- [5] D.-G. for Research Sustainable Energy Systems. European SmartGrids Technology Platform - Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future, 2006.
- [6] M.P.F. Hommelberg, C.J. Warmer, I.G. Kamphuis, J.K. Kok, G.J. Schaeffer. Distributed Control Concepts using Multi-Agent technology and Automatic Markets, 2007.
- [7] Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems. *A MAS architecture for microgrid control*, November 2005.
- [8] Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting. *A multi-agent system for microgrids*, 2004.
- [9] Proceedings of the IEEE Power Systems Conference and Exposition (PSCE 2009). *Multi-Agent Systems in a Distributed Smart Grid: Design and Implementation*, Seattle, WA USA, March 2009.
- [10] REN21 Renewable Energy Policy Network. Renewables 2007 Global Status Report [Online]. http://www.ren21.net/pdf/RE2007_Global_Status_Report.pdf, 2007.
- [11] Sandia National Laboratories. Agent-based control of distributed infrastructure resources [Online]. www.sandia.gov/scada/documents/sand_2005_7937.pdf, 2006.
- [12] M. Wooldridge and N. R. Jennings. Intelligent Agents: Theory and Practice. *Knowledge Engineering Review*, Vol. 10, No. 3, 1995.