

Verteilte Stromproduktion

Motivation, Herausforderungen und Chancen

Patrick Senti

Departement für Informatik, ETH Zürich

patrick senti@student.ethz.ch

Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt Motivation und Herausforderungen für den Einsatz von verteilten und erneuerbaren Energieressourcen. Virtuelle Kraftwerke erreichen durch Zusammenfassung und automatisierte Steuerung von verteilten Stromgeneratoren trotz unsteten Produktionsleistungen ähnliche Leistungsmerkmale wie konventionelle Kraftwerke. Die informationstechnischen Anforderungen an ein virtuelles Kraftwerk und verschiedene Lösungsansätze wie eine Serviceorientierte Architektur, Multiagentensysteme, verteilte Verbrauchsprognosen und automatisierte Produktionssteuerung werden erläutert. Da es zur Kontrolle elektrotechnischer Vorgänge kurzer Reaktionszeiten von Millisekunden bis zu wenigen Sekunden bedarf, nehmen die für verteilte Produktion erforderliche Kommunikationsinfrastruktur und die eingesetzten Algorithmen eine zentrale Bedeutung ein. Zwei Feldstudien über die Auswirkungen verteilter Energieproduktion auf den Strombedarf in Haushalten zeigen, dass der Informationstechnik dabei eine Schlüsselfunktion zukommt.

1 Einführung

Dieser Bericht beschreibt im ersten Teil Motivation und Herausforderungen für den Einsatz von verteilten und erneuerbaren Energieressourcen (DER, Distributed Energy Resources; RES, Renewable Energy Sources). Im zweiten Teil werden virtuelle Kraftwerke vorgestellt, die es durch Zusammenfassung verschiedener Formen von DER ermöglichen, ähnliche Leistungsmerkmale wie konventionelle Kraftwerke zu erreichen. Insbesondere beleuchten wir die informationstechnischen Anforderungen und Lösungsansätze für den Aufbau von virtuellen Kraftwerken und einer geeigneten Kommunikationsinfrastruktur. Wir schliessen den Bericht ab mit der Schilderung von zwei Studien, welche die Auswirkungen des Einsatzes verteilter Energieproduktion in Wohngebieten untersuchten.

1.1 Definition von verteilten und erneuerbaren Energieressourcen

Verteilte und erneuerbare Energieressourcen lassen sich nach der installierten Leistungskapazität sowie wie nach der Prognose-Verlässlichkeit und Steuerbarkeit einteilen [3, 14] :

Leistung	Generator/Kraftwerk	Abkürzung	Prognostizier-/Steuerbar
1-6MW	Gas-Blockheizkraftwerke	CHP, Combined Heat and Power	Ja
0.6-2.5MW	Wind-Turbinen	WTG, Wind Turbine Generator	Nein
1kW-1MW	Solarzellen	PV, Photovoltaik	Nein
1kW-10kW	Kraft-Wärmekoppelung	mCHP, mini-Combined Heat and Power	Ja

Tabelle 1: Verteilte Energieressourcen und Kraftwerksgrössen

1.2 Motivation für verteilte Produktionsformen

Die Stromproduktion verläuft weltweit zum grössten Teil nach einem zentralisierten System: Grosskraftwerke produzieren Strom, der über mehrstufige Verteilnetze zu den Verbrauchern (Industrie, Haushalte) gelangt. Aus physikalischen Gründen wird jeweils exakt soviel Strom produziert, wie verbraucht wird.

Verschiedene Faktoren wie Umweltschutz, Kostenüberlegungen und neue Technologien führen dazu, dass die Stromproduktion nicht mehr zentral, sondern in dezentralen, eigenständigen und vor allem kleineren Kraftwerken erfolgen wird. Ausgelöst wird diese Entwicklung nicht zuletzt durch ein weltweit steigendes Bedürfnis nach ökologisch nachhaltiger Energie aus erneuerbaren Ressourcen wie Wind und Sonne.

Grosskraftwerke erfordern Investitionen im Umfang mehrerer Milliarden Euro. Beim Transport von Strom über weite Strecken entstehen zudem *Verluste* in erheblichem Ausmass. Dezentrale Kraftwerke wie Photovoltaik-Anlagen (PV) und Blockheizkraftwerke (CHP, Combined Heat and Power) können mit *vergleichsweise wesentlich tieferen Investitionskosten* näher beim Kunden gebaut und damit zu *wesentlich tieferen Kosten betrieben* werden. Kleinst-Blockheizkraftwerke (mCHP, mini-Combined Heat and Power) ermöglichen die Produktion direkt beim Kunden. Überflüssige Kapazität wird dem Stromnetz gegen Verrechnung eingespeist [6].

1.3 Herausforderungen und Chancen

Die Stromproduktion mit verteilten Energieressourcen erhöht die Anzahl Teilnehmer sowohl in wirtschaftlicher wie technischer Hinsicht, wodurch der Bedarf an Koordination steigt.

Werden DER als alternative Produktionsform ans Netz *angeschlossen*, können sie die in traditionellen Grosskraftwerken vorliegenden Kapazitäten nicht ersetzen, weil DER nicht kontinuierlich produzieren. Ihre Kapazität muss also gleichwohl anderswo vorgehalten werden, um jederzeit die geforderte Strommenge produzieren zu können. Ein DER für sich weist also nicht die notwendige Verlässlichkeit in Bezug auf minimale und geplante Kapazität oder etwa die Frequenzregulierung auf, um eine *Integration* als Kraftwerk zu ermöglichen. Die *elektrotechnische Herausforderung* liegt darin, eine genügend grosse Anzahl von geographisch verteilten oder in Art und Weise unterschiedlichen DER so zusammenzufassen und zu steuern, dass diese in der Summe die Voraussetzungen an ein vollwertiges Kraftwerk erfüllen und damit im Stromnetz integrierbar sind [11].

Eine weitere, nicht zu vernachlässigende, ebenfalls elektrotechnische Herausforderung liegt zudem in der *möglichst verlustfreien Speicherung von Strom*, der zum Zeitpunkt der Produktion in DER-Anlagen überschüssig ist: Photovoltaik-Anlagen produzieren Strom, wenn die Sonne scheint, unabhängig der aktuellen Verbrauchssituation. In diesem Fall muss die produzierte Energie dazu verwendet werden, einen Energiespeicher zu befüllen; beispielsweise treibt dieser Strom Pumpen an, die Wasser in ein Reservoir von Wasserkraftwerken transportieren [6].

Bei der verteilten Stromerzeugung (DG, Distributed Generation) entsteht somit eine *neue Komplexität* im Betrieb des Stromnetzes: Dieses entwickelt sich weg von einer hierarchischen Organisationsstruktur, hin zu einem Netz unabhängig operierender Einheiten, die miteinander kooperieren. In Analogie zum Internet könnte man vermuten, dass diese *informationstechnische Problemstellung* bereits gelöst ist (z.B. mit Serviceorientierten Architekturen oder Peer-to-Peer Computing). Doch im Unterschied zum Internet müssen im Stromnetz physikalische Prozesse kontrolliert werden, teilweise mit *Reaktionszeiten von wenigen Millisekunden*, um auf Veränderungen des Strombedarfs und dadurch entstehende Instabilitäten zu reagieren [15, 13, 9].

Eine Chance ergibt sich durch breiten *Einsatz der Informationstechnik bei Verbrauchern* selbst, namentlich mittels kontinuierlicher Messung des Energieverbrauchs und Reaktion auf den aktuellen Strompreis (sog. Demand Response). Durch die unmittelbare Reaktion von Verbrauchern auf aktuelle Spitzenbelastungszustände des Stromnetzes (sog. Peak-Load), insbesondere durch Abschaltung von nicht zeitkritischen Verbrauchern wie Klimaanlage, Waschmaschinen, Heizungen und Gefrier-/Kühlschränken, können Spitzenbelastungen reduziert werden (sog. Load-Shaving). Eine Reduktion des nicht-kritischen Verbrauchs um 5-15% der Spitzenlast ermöglicht es den Stromproduzenten, auf teurere und wenig effiziente Produktionsformen zu verzichten und so einen positiven Ertrag zu erwirtschaften und gleichzeitig ökologisch nachhaltiger zu produzieren [2].

Moleshi/Kumar weisen allerdings darauf hin, dass ein derart auf Effizienz getrimmtes System letztlich häufiger an den eigenen Kapazitätslimiten läuft, wodurch eine *höhere Wahrscheinlichkeit von Fehlfunktionen und Instabilitäten* besteht. Es besteht also die Notwendigkeit, die Netzsteuerung „intelligent“ zu gestalten [9].

Aufgrund verteilter und erneuerbarer Energieressourcen und der damit verbundenen Ausweitung der Zahl der Marktteilnehmer ergibt sich schliesslich die *regulatorische Herausforderung*, diesen Veränderungsprozess für Produzenten, industrielle und private Verbraucher transparent und marktorientiert zu gestalten, um einerseits faire Bedingungen und andererseits eine *zuverlässige, kostengünstige Stromversorgung zu garantieren* [6].

2 Integration verteilter Stromproduktionsanlagen mittels virtuellen Kraftwerken

Durch Zusammenfassung verteilter Produktionsformen (z.B. Wind-, Photovoltaik- und Blockheizkraftwerke) zu einem *virtuellen Kraftwerk* (VPP, Virtual Power Plant) werden die Produktionsmengen stochastisch einschätzbar und gewährleistet so die Prognose von Produktionskapazitäten. Derart zusammengeschaltete DER/RES garantieren planbare Kapazitäten und können vollständig ins Stromnetz integriert werden. Erst dadurch ersetzen sie konventionell produzierte Kapazität [6]. Houwing/Ilic [4] weisen darauf hin, dass virtuelle Kraftwerke von Microgrids zu unterscheiden sind: Das Betriebsziel von Microgrids umfasst die Abgrenzung von Energieflüssen innerhalb eines Clusters, nicht aber die koordinierte Steuerung des Energieverbrauchs oder der Produktionsleistung, wie dies bei virtuellen Kraftwerken der Fall ist.

2.1 ICT: Bedeutung und Fragestellungen

Die *intelligente Steuerung* verteilter Generatoren erfordert im Rahmen eines VPP im wesentlichen zwei Elemente: 1. Zeitnahe Prognose der Produktionsleistung und des Verbrauchs, 2. (Fern-)Steuerung von Produktion und Verbrauch zur Optimierung des Gesamtsystems. Die Koordination von DER erfordert deshalb den kontinuierlichen, zeitnahen Austausch von Daten und Anweisungen, wie beispielsweise: Derzeitige Produktionsleistung und verfügbare Kapazität, Anweisungen zur Produktionssteuerung, Prognosen über künftige Kapazität und Verbrauch [4, 8, 6]. Die Anzahl von DER-Generatoren umfasst bei Installationen im Wohnbereich Größenordnungen von mehreren 10'000 Einheiten (Generatoren, Verbraucher) pro VPP. Aus Sicht der Informationstechnik betrachtet ergeben sich folgende Modelle von VPP, wobei jede Einheit einen Netzknoten darstellt:

1. VPP mit zentraler Steuerung: verteilte Generatoren kommunizieren mit einer zentralen Steuerungseinheit; Client-Server Modell¹
2. VPP mit aggregierter Steuerung: verteilte Netzknoten, organisiert in einer Hierarchie
3. VPP mit total dezentralisierter Steuerung: vollständig vermaschtes Netz (z.B. als Overlay-Netz)

Aufgrund dieser Typisierung als *verteilt System*, der genannten Größenordnung und den Zielsetzungen eines VPP wird deutlich, welche Anforderungen und Fragestellungen sich für den Einsatz von ICT ergeben. Tabelle 2 führt die wesentlichen Fragestellungen auf und mögliche Lösungsansätze werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.2 Softwareagenten für verteilte Koordination auf allen Ebenen

In VPP übernehmen Softwareagenten die Steuerung und Prognose der Produktionskapazität von erneuerbaren Energien. Agenten entscheiden sowohl aufgrund ihres lokalen Wissens über den aktuellen und prognostizierten Bedarf, sowie abhängig von aktuellen Stromtarifen und ggf. weiteren Parametern darüber, ob und welche Generatoren zu welchem Zeitpunkt eingeschaltet werden [4].

Lu/Chen [7] schlagen vor, die ICT-Architektur als Multiagentensystem (MAS) zu implementieren, so dass nicht nur ein VPP selbst Agenten zur Koordination von verteilten Produktionskapazitäten einsetzt,

¹vgl. <http://www.encorp.com/content.asp56.htm> als Beispiel einer kommerziellen Software-Anwendung für dieses Modell

Anforderung	Fragestellung
Verteilte Koordination von DER/RES	Wie kann verteilte Koordination unabhängiger Einheiten realisiert werden?
Leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur	Wie kann die Kommunikationsinfrastruktur technische und kommerzielle Anforderungen umsetzen?
Lose Koppelung	Wie können Netz-Teilnehmer adhoc, ohne Konfiguration kommunizieren?
Fehlertoleranz und Selbst-Korrektur	Wie kann die Stabilität auch bei Fehlfunktionen oder Ausfall gewährleistet werden?
Ressourcenknappheit	Wie kann trotz knapper Rechenleistung eine „intelligente“ Steuerung erreicht werden?
Marktmechanismen	Wie können Angebot und Nachfrage effizient zusammengeführt werden?
Verteilte Prognose, Demand Response	Wie können effizient Prognosen über Verbrauch und Produktionskapazität verteilter Einheiten erstellt werden?

Tabelle 2: Informatik-Problemstellungen im Rahmen eines VPP

sondern letztlich das gesamte Stromnetz aus einer Ansammlung lose gekoppelter, miteinander kommunizierender, lernfähiger Softwareagenten besteht. Ein VPP bedarf dabei einer Vielzahl von Agenten, beispielsweise für die Koordination, Fehler-Diagnose, Selbst-Korrektur, Datenkollektion, Prognosen von Verbrauch und Produktion, Simulation und Laufzeit-Koppelung.

Als Implementationstechnologie wird das MAS-Framework JADE² vorgeschlagen, das den IEEE-FIPA Standard³ implementiert. JADE unterstützt dabei alle möglichen Formen von VPP gemäss obiger Aufstellung (zentral, aggregiert, dezentral).

2.3 Lose Koppelung – Zusammenführung unterschiedlicher Partner

Ein VPP wird typischerweise von verschiedenen Teilnehmern (VPP-Betreiber, Produktionseigner, Marktteilnehmer) betrieben, die nicht zwingend über kompatible Informatikmittel verfügen, aber dennoch miteinander kommunizieren müssen. Einen interessanten und konkreten Ansatz präsentieren Andersen et al [1] auf Basis einer SOA. Dabei kommunizieren die Partner über vordefinierte Schnittstellen und bieten ihre Leistungen als Webservices an. Eine prototypische Umsetzung wurde auf Basis der in Abbildung 1 beschriebenen Technologien realisiert.

Grundsätzlich scheint eine Serviceorientierte Architektur eines VPP interessant, da sie verschiedene Modelle der Zusammenarbeit ermöglichen: Beispielsweise sind unterschiedliche Konfigurationen von VPP auf Basis von Kleinst-Blockheizkraftwerken vorstellbar, die in einzelnen Haushalten installiert sind [4]. Die verschiedenen Konfigurationen unterscheiden sich im Wesentlichen darin, ob und an welcher Stelle des VPPs ein aktiver Steuerungsmechanismus eingesetzt wird, mit dem Ziel, die Kosten für den Verbraucher und die Erträge für den Betreiber des VPP zu optimieren. Ausserdem können mit demselben Prinzip auch Softwareagenten umgesetzt werden – ein Web-Service würde dabei durch einen Softwareagenten angeboten.

²Java Agent Development Environment, <http://jade.tilab.com/>

³The Foundation for Intelligent Physical Agents, <http://www.fipa.org>

The Challenge	The Solution Technologies
The challenge of loose association	Service Oriented Architecture and the Broker pattern
The challenge of generic adoption	Service Oriented Architecture and the use of XSD and WSDL.
The challenge of interchangeable strategies	Principles from the injection and strategy patterns as well as .Net assemblies
The challenge of security	Use of WS-* and WCF security

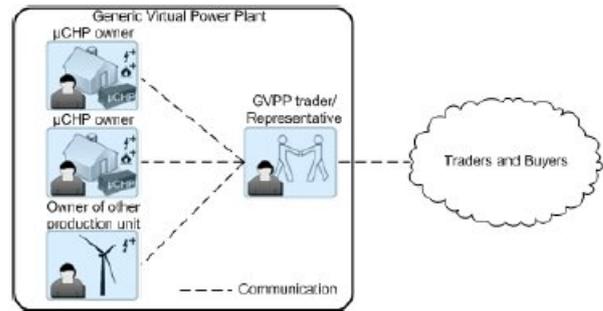


Abbildung 1: VPP mit Web Services [1]

2.4 Leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur

Eine zentrale Anforderung an die Kommunikationsinfrastruktur betrifft die Leistungsfähigkeit und die Ausfallsicherheit: Moleshi/Kumar [9] zeigen auf, dass über verschiedene Stufen des Stromnetzes betrachtet unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der erlaubten Latenzzeit und den erforderlichen Bandbreiten bestehen. Es ist zu beachten, dass ein VPP prinzipiell Ressourcen mehrerer Netz-Stufen zusammenfassen kann, beispielsweise aufgrund geographischer Verteilung (Abbildung 2). Die Anforderungen lassen sich aufteilen nach dem Anwendungszweck für die Kommunikation:

Prozess-Steuerung auf physikalischer Ebene: Eine Latenzzeit von 10ms bis 1 Sekunde ist erforderlich, damit ein Softwareagent innert 5-6 Frequenzzyklen (80-100ms) den aktuellen Zustand erfassen und ggf. Aktionen auslösen kann. Zu messende Daten umfassen beispielsweise die Frequenz und Spannung oder Veränderungen in einem Netzabschnitt. Die Reaktionszeit hängt dabei wesentlich von den zu erwartenden Latenzzeiten der Kommunikation ab und darf 0.2-6ms nicht überschreiten: im Fehlerfall ist ein Generator innert 2s abzuschalten und vom Netz zu isolieren. Konsequenterweise müssen die entsprechenden Sensoren und Softwareagenten möglichst nahe an den zu steuernden Geräten und Leitungen platziert sein. Sood et al [13] schätzen das Datenvolumen pro Netzelement (z.B. Generator, Umschalter, Transformer) auf bis zu 2.5Mbit/s; im Fehlerfall kann das Datenvolumen pro Netzelement sogar doppelt so hoch ausfallen. Diese Leistungsanforderungen werden von Glasfaserleitungen (Festinstallation), WiMax (Funknetz) und LTE (Mobiletelefonie-Standard) unter Verwendung von TCP/IP als Kommunikationsprotokoll erfüllt.

Daten-Abfrage/-Kommunikation und kommerzielle Integration: Eine Latenzzeit von wenigen Sekunden bis Stunden erfüllt die Anforderungen kommerzieller Anwendungen. Die Marktanbindung kann mit einer Antwortzeit von bis zu 10 Minuten (z.B. zum Abbau von Spitzenlast) oder gar bis zu mehreren Stunden (z.B. Rechnungsstellung, Administration) betrieben werden. Als mögliche Infrastruktur kommen für diesen Anwendungszweck das öffentliche Internet – oder gleichartige private Netze auf Basis von TCP/IP – und Webservices als Integrationsmittel unabhängiger Partner ebenfalls in Frage.

2.5 Fehlertoleranz und Selbstkorrektur mit limitierten Ressourcen

Um die Sicherheit und Verlässlichkeit eines VPP zu gewährleisten, gelten hohe Anforderungen an die Betriebs- und Ausfallsicherheit. Dazu zählen vor allem die Fähigkeit des Systems, Fehler zu erkennen und selbst oder in Zusammenarbeit mit anderen Einheiten zu korrigieren (*Self-Healing*). Bei

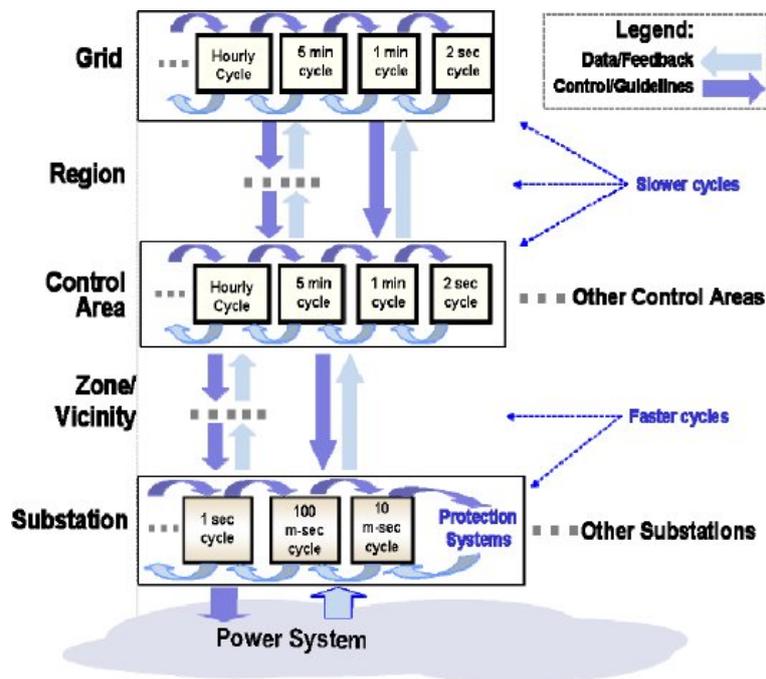


Abbildung 2: Latenzzeiten unterschiedlicher Stufen des Stromnetzes [9]

Fehlern, die den Eingriff vor Ort erfordern und daher nicht vom System selbst korrigiert werden können, soll die Korrektur ohne Systemabschaltung möglich sein (*Hot Configurability*). In der bestehenden Netz-Infrastruktur werden zu diesem Zweck elektrotechnische Mechanismen (z.B. Sicherungen) auf Substation-Ebene eingesetzt.

Webservices und Multiagentensysteme bieten mit loser Koppelung und für Fehlerbehebung (Koordination von Massnahmen) interessante Ansätze, erfordern jedoch eine umfangreiche Infrastruktur und die Verfügbarkeit entsprechender Rechenleistung in jedem Gerät. Vyatkin et al [16] weisen darauf hin, dass diese Rechenressourcen in der industriellen Praxis nicht verfügbar sind. Als Alternative präsentieren sie mit EnergyWeb eine Architektur auf Basis des komponentenorientierten Standards IEC⁴-61499 für verteilte Prozess-Steuerung in industriellen Anwendungen und integrieren diesen mit dem Standard IEC-61850 für Energie-Netzautomation, wobei ein Funktionsblock – ein verteilter Algorithmus – als Steuerungsschicht hinzugefügt wird [15]. Diese wird nur dann aktiv, wenn ein Fehler aufgrund physikalischer Messungen festgestellt wird, und startet ein deterministisches Fehlerbehebungsprotokoll. Funktionsblöcke sind in Hard- oder Software implementierte, ereignisgesteuerte Zustandsautomaten, die bzgl. Kommunikation und Verteilung transparent in den zu steuernden Geräten integriert sind. Der Vorteil dieser Architektur liegt darin, dass nach diesen Standards gebaute Geräte erweiterbar sind, also keine neuen Technologien notwendig sind. Das Open-Source Projekt FBench⁵ stellt eine grafische Entwicklungs- und Testumgebung zur Verfügung.

2.6 Automatisierung des Betriebs: Verteilte Prognose, Marktmechanismen und Demand Response

Der reibungslose Betrieb von VPP-Installationen mit mehreren 10'000 DER-Einheiten (d.h. teilnehmenden Haushalten) erfordert einen hohen Automatisierungsgrad. Im traditionellen Stromnetz erfolgt die

⁴www.iec.ch

⁵http://sourceforge.net/projects/oooneida-fbench/

Produktionsplanung entsprechend des erwarteten Verbrauchs nach täglich zentral vorgegebenen Planungen. Aus Erfahrung bekannte Verbrauchsmuster von Haushalten, sowie die individuell mit Industrieverbrauchern vereinbarten Strommengen, dienen als Ausgangslage. Spitzenlasten werden durch z.B. geographisch festgelegte Massnahmen zeitlich verschoben, so etwa durch Abschaltung von Boilieranlagen während des Tages oder des Stromunterbruchs für Waschmaschinen während der Mittagszeiten.

Diese Art von Lastregulierung ist mit verteilten Produktionskapazitäten nur noch schwer nach zentralen Vorgaben durchzusetzen: Einerseits sind mehr Marktteilnehmer involviert, andererseits ist erwünscht, dass die Verbraucher selbst ihren Verbrauch nach Marktkriterien beeinflussen können.

Mit preisgesteuerten Massnahmen entscheidet der einzelne Verbraucher autonom darüber, ob er zu einem bestimmten Marktpreis bereit ist, Strom zu beziehen oder seinen Verbrauch auf einen späteren Zeitpunkt verschieben will. Als exemplarisches Beispiel für diesen Ansatz steht der Feldtest von Houwing et al [4], der den positiven Effekt von lokal eingesetzten Agenten für den Einsatz verteilter Produktionskapazität mittels Mini-Blockheizkraftwerken zeigt, sofern der Bedarf pro Haushalt bekannt ist. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, dass sich dennoch Spitzenlasten ergeben können, der Verbrauch also insgesamt nicht optimiert wird. Für systemweit optimale Entscheidungen reichen lokale Informationen nicht aus, es müssen auch Informationen anderer Agenten einbezogen werden.

Ein ähnlicher, aber in seiner Wirkung unterschiedlicher Ansatz ist die Verwendung von Markt- und Auktionsverfahren, wobei eine bestimmte Menge Energie angeboten wird, die von den Verbrauchern eingekauft werden kann. Der Vorteil liegt dabei insbesondere darin, dass eine Überallokation vermieden wird, und somit Spitzenbelastungen optimiert werden können [5].

Diese Zielsetzung erfüllt der Aggregationsalgorithmus von Pournaras et al [10]: Dieser organisiert die Agenten in einer Baumstruktur. Jeder Agent berechnet aufgrund lokaler Erfahrungswerte und seinen lokalen Bedingungen – Temperatur, Status des Kühlschranks, Waschplan etc. – wahrscheinliche Varianten des voraussichtlichen Energiebedarfs und stellt diese Pläne seinem übergeordneten Agenten zur Verfügung. In jedem Aggregationsschritt wird nach einer Optimierungsfunktion der geeignetste Plan ausgewählt und wiederum den über- und untergeordneten Agenten mitgeteilt (Abbildung 3). Simulationen zeigen, dass sich mit diesem verteilten Algorithmus eine Optimierung von 36% bis 78% gegenüber einer zentralen Entscheidungsinstanz bzw. zufälligen Wahl von Plänen erreichen lassen.

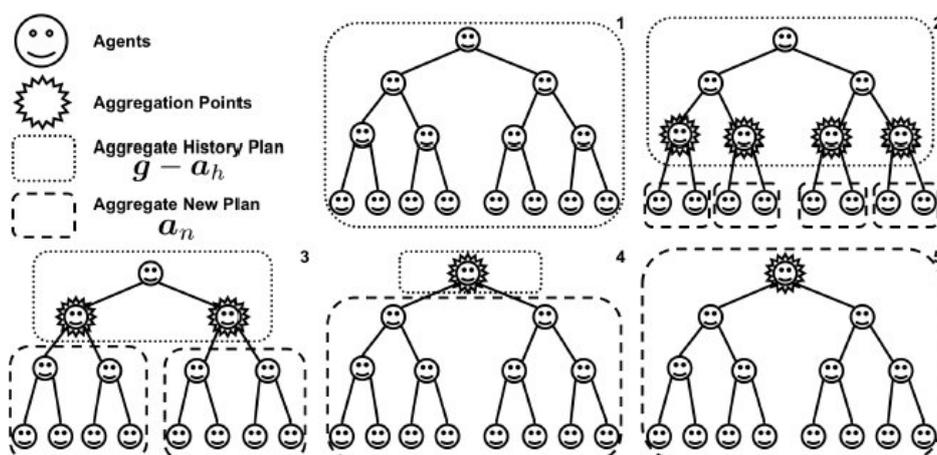


Abbildung 3: Multi-Agenten-Hierarchie zur Optimierung der Ressourcenplanung [10]

3 Anwendungen und Erfahrungen

Dieses Kapitel stellt zwei Studien vor, die den Effekt von Mini-Blockheizkraftwerken untersuchten.

3.1 PowerMatcher – Einsatz eines Multiagentensystems

Das Konzept „PowerMatcher“⁶ implementiert einen verteilten Markt-Mechanismus auf Basis von Softwareagenten, der mittels des beschriebenen Auktionsverfahren die zu einem VPP zusammengeschlossenen Generatoren steuert. Das Konzept wurde vom Energy Research Center Netherlands (ECN)⁷ in Zusammenarbeit mit Industriepartnern und unter Beteiligung der EU realisiert.

Die Feldstudie untersuchte, inwiefern der Einsatz eines VPP mit 10 Mini-Blockheizkraftwerken (mCHP, 1KW-Leistung) die Spitzenlast innerhalb des lokalen Distributionsnetzes der angeschlossenen Haushalte reduzieren kann. Als Referenzmessung diente der zuvor ermittelte Verbrauch ohne VPP oder mCHP. Die in den Haushalten installierten VPP-Knoten kommunizierten mit einem zentralen Markt-Server über Mobilkommunikation (UMTS/GPRS).

Die Ergebnisse zeigen, dass unter Einsatz des VPP der Spitzenbedarf gegenüber dem konventionellen Stromnetz um bis zu 30% reduziert werden konnte [12].

3.2 Einfluss von Tarifmodellen und Demand Response

Im Rahmen einer Studie über den Energieverbrauch in Haushalten (Flandern, Belgien) wurde der Einfluss verschiedener Tarifmodelle und der daraus resultierenden Verbrauchsanpassung untersucht [2]. Die Studie berechnete die Kostenauswirkungen verschiedener Tarifsysteme, wobei eine Kostenoptimierung pro Haushalt angestrebt wurde. Die „Fit and forget“-Installation von Photovoltaik-Anlagen (2kW-Leistung) und Kleinst-Blockheizkraftwerken (1kW-Leistung) sah keinerlei Koordination von Produktion und Verbrauch zwischen den Haushalten vor. Der Betrachtungszeitraum umfasste ein Jahr bei einem angenommenen durchschnittlichen Verbrauch von 5000kWh/Haushalt.

Die Ergebnisse zeigen, dass nicht unter allen Modellen und Tarifschemen von einem positiven Effekt für die Haushalte ausgegangen werden kann. So sind die Kosten einer PV-Anlage, in Kombination mit einem Pauschaltarif, zwar innert 25 Jahren amortisierbar; bei einem zeitgesteuerten Tarif (ToU, Time of Use) dauert diese Amortisation aber bereits 38 Jahre. Andererseits lassen sich mit mCHP und einem Pauschaltarif bereits nach 3.3 Jahren, unter Annahme eines marktaktuellen Tarifs (RTP, Real-Time Pricing) bereits nach 4.2 Jahren die Investitionen zurückzahlen.

⁶www.powermatcher.nl

⁷www.ecn.nl

4 Schlussfolgerungen

Die Hauptvorteile verteilter Energieproduktion liegen einerseits in den tieferen Investitionen im Vergleich zu konventionellen Grosskraftwerken, sowie in der Nutzung erneuerbarer Energien. Die Herausforderungen ergeben sich durch die un stetigen Produktionskapazitäten insbesondere bei erneuerbaren Energieformen wie Sonne und Wind: Diese DER können zwar ans Netz angeschlossen werden, ersetzen dadurch aber keine konventionell produzierte Energie. Im Gegenteil erzeugen die Leistungsfluktuationen Instabilitäten und verursachen zusätzliche Kosten.

Der lokal optimierte Ansatz, verteilte Energie dennoch – als Kostenreduktionsmassnahme – *anzuschliessen*, stellt positive Effekte in Aussicht. Diese lassen sich hingegen nur unter bestimmten Vorbedingungen realisieren, wie stabilen Tarifstrukturen, der Präzision von Prognosen, der Verfügbarkeit von fossilen Brennstoffen, und dem jederzeit rationalen Verhalten der Verbraucher. Es ist zweifelhaft, ob diese Bedingungen in der Realität vorausgesetzt werden können. Im direkten Vergleich überzeugt daher der Ansatz der virtuellen Kraftwerke.

Virtuelle Kraftwerke ermöglichen dank einer koordinierten Steuerung verteilter Energieproduktionsanlagen deren Integration im Stromnetz. Im Verbund mit Marktmechanismen und verteilten Algorithmen zur Lastprognose und Produktionssteuerung lässt sich der Bedarf an konventionell produzierter Energie gemäss den zitierten Feldstudien nachweislich und massgeblich reduzieren.

Verteilte Steuerungsmodelle, insbesondere die Verwendung von Multiagentensystemen, demonstrieren das Potential der diskutierten Konzepte und Technologien. Der Aufwand scheint aber für eine grossräumige Verbreitung enorm (Hardware-Installation, Kommunikationsinfrastruktur) und setzt in den geschilderten Szenarien die Einführung neuer Infrastruktur-Technologie voraus, was insbesondere Risiken bzgl. Netzstabilität und Ausfallsicherheit birgt.

Vielsprechend sind deshalb meiner Meinung nach Ansätze, die etablierte Industriestandards nutzen, insbesondere weil sie darauf abzielen, bestehende Infrastruktur „nahtlos“ zu erweitern, anstatt sie durch neue Technologie zu ersetzen.

Daraus leite ich folgende Fragestellungen für weitere Arbeiten ab:

1. Wie können Multiagentensysteme und deren verteilte Algorithmen optimiert werden, um den Bedingungen wie Ressourcenknappheit, wirtschaftliche Kosteneffizienz und kurzen Latenzzeiten im realen Stromnetz Rechnung zu tragen?
2. Sind die geschilderten verteilten Algorithmen und Multiagentensysteme im Rahmen der „Open Function-Block“ Architektur nach IEC-61499 realisierbar?
3. Welche Anforderungen (Bandbreite, Verbindungsstabilität, Verfügbarkeit, Ausfallsicherheit) an die Kommunikationsinfrastruktur bestehen im realen Stromnetz, um die skizzierten informationstechnischen Fragestellungen zu lösen?
4. Wie können die Konzepte der Serviceorientierten Architektur und Multiagentensysteme mittels den geschilderten praxiserprobten IEC-Standards effizient innerhalb existierender Infrastrukturen etabliert werden?

Die Notwendigkeit einer engen, interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Informations- und Elektrotechnik wird hier deutlich sichtbar: Im jeweiligen Fachgebiet scheinen die Probleme an sich gelöst, die integrierte Betrachtung im Hinblick auf den Einsatz im realen Stromnetz ergibt jedoch neue und interessante Herausforderungen.

Literatur

- [1] P. Andersen, B. Poulsen, C. Trholt, and J. Ostergaard. Using service oriented architecture in a generic virtual power plant. *Information Technology: New Generations, 2009. ITNG '09. Sixth International Conference on*, pages 1621 –1622, april 2009.
- [2] G. Deconinck and B. Decroix. Smart metering tariff schemes combined with distributed energy resources. *Critical Infrastructures, 2009. CRIS 2009. Fourth International Conference on*, pages 1 –8, 27 2009-april 30 2009.
- [3] F. Guan, D. Zhao, X. Zhang, B. Shan, and Z. Liu. Research on distributed generation technologies and its impacts on power system. pages 1 –6, 6-7 2009.
- [4] M. Houwing and M. Ilic. The value of IT for virtual power plants with micro cogeneration systems. *Systems, Man and Cybernetics, 2008. SMC 2008. IEEE International Conference on*, pages 1 –6, oct. 2008.
- [5] I. Kamphuis, P. Carlsson, C. Warmer, J. Kester, and J. Kok. Distributed intelligence for supply/-demand matching to improve embedding of distributed renewable energy sources. In *Proceedings of CRIS 2004, 2nd International Conference on Critical Infrastructures*, Grenoble, Oktober 25-27 2004.
- [6] J. P. Lopes, N. Hatziaargyriou, J. Mutale, P. Djapic, and N. Jenkins. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities, 2007.
- [7] M. Lu and C. Chen. The design of multi-agent based distributed energy system. pages 2001 –2006, oct. 2009.
- [8] S. Lukovic, I. Kaitovic, M. Mura, and U. Bondi. Virtual power plant as a bridge between distributed energy resources and smart grid. *System Sciences (HICSS), 2010 43rd Hawaii International Conference on*, pages 1 –8, jan. 2010.
- [9] K. Moslehi and R. Kumar. Smart grid - a reliability perspective. *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2010*, pages 1 –8, jan. 2010.
- [10] E. Pournaras, M. Warnier, and F. M. T. Brazier. Local agent-based self-stabilisation in global resource utilisation. 2010.
- [11] D. Pudjianto, C. Ramsay, and G. Strbac. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. *Renewable Power Generation, IET*, 1(1):10 –16, march 2007.
- [12] B. Roossien. Field-test upscaling of multi-agent coordination in the electricity grid. pages 1 –4, june 2009.
- [13] V. Sood, D. Fischer, J. Eklund, and T. Brown. Developing a communication infrastructure for the smart grid. pages 1 –7, oct. 2009.
- [14] VBG PowerTech e.V. VGB Stromerzeugung Europa 2003, 2003.
- [15] V. Vyatkin. The IEC 61499 standard and its semantics. *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, 3(4):40 –48, dec. 2009.
- [16] V. Vyatkin, G. Zhabelova, N. Higgins, M. Ulieru, K. Schwarz, and N.-K. C. Nair. Standards-enabled smart grid for the future energy web. pages 1 –9, jan. 2010.