

Selbstorganisierte Koordinationsverfahren für ein dezentrales Supply-Demand Matching im elektrischen Verteilnetz

Christian Hinrichs

christian.hinrichs@uni-oldenburg.de

Abstract: Zukünftige (elektrische) Transport- und Verteilnetze zeichnen sich im Gegensatz zu heutigen hierarchischen, statischen Netzen durch eine variierende Anzahl von Teilnehmern aus, die die Netze bidirektional in stark fluktuierender Intensität beanspruchen werden. Um den Ansprüchen solch einer heterogenen, schwierig vorherzusagenden Nutzung gerecht zu werden, bedarf es einer neuartigen adaptiven, dynamischen Organisations- und Kommunikationsstruktur. Das vorgestellte Dissertationsvorhaben hat die Zielsetzung, ausgewählte Akteure des elektrischen Verteilnetzes, wie stochastisch einspeisende Erzeuger und regelbare Verbraucher, mittels einer Selbstorganisationsstrategie zu verknüpfen und simulativ in einem Multiagentensystem zu untersuchen. Dieses selbstorganisierende System soll dynamisch Einsatzpläne für die Akteure erzeugen, d. h. sich zur Laufzeit an die veränderlichen Umweltbedingungen wie beispielsweise Prognoseabweichungen anpassen. Die Akteure sind dabei adaptive, autonome, soziale Agenten, die danach streben, kooperativ durch Lastausgleichsmechanismen das Verteilnetz zu entlasten, regenerative Erzeuger optimal zu nutzen und insgesamt damit eine CO₂-Einsparung zu erreichen.

1 Einleitung

Um die Stabilität des elektrischen Verteilnetzes zu gewährleisten ist ein stetiges *Supply-Demand Matching* erforderlich. In der klassischen Struktur der Energieversorgung wird dies durch eine Einsatzplanung basierend auf Prognosen sowie mehrstufige reaktive Nachregelungsverfahren erreicht. Diese Mechanismen stützen sich jedoch auf die Vorhersagbarkeit einer weitestgehend bekannten Masse von Verbrauchern sowie einer unter anlagentypischen Restriktionen stehende Population von steuerbaren Erzeugern. Durch die zunehmende Integration dezentraler Erzeugungsanlagen zur Nutzung regenerativer Energien werden diese Voraussetzungen jedoch mehr und mehr verletzt. Die fluktuierende Einspeisecharakteristik bei gleichzeitiger Nichtsteuerbarkeit insbesondere der wetterabhängigen dezentralen Erzeuger führt zu einer Betriebsunsicherheit, der mit den herkömmlichen Methoden zur Nachregelung auf Erzeugerseite (Primär-/Sekundärregelung etc.) nicht mehr begegnet werden kann. Als Ergänzung kann daher das *Demand Side Management*, also die Steuerung von Verbrauchern, in Betracht gezogen werden. Dieses Konzept wird bereits seit einigen Dekaden untersucht [GC88], erfährt jedoch im Rahmen der aktuellen Energiedebatte neue Aufmerksamkeit. Der Vorteil steuerbarer Lasten besteht in der

kurzfristigen Planungsflexibilität gegenüber der starren Betriebsparameter auf Erzeugerseite, was insbesondere koordinierte Lastverschiebungen beispielsweise mit dem Ziel der Glättung eines Gesamtlastganges sowohl proaktiv, also langfristig geplant, als auch reaktiv ohne zusätzliche Kosten (im Gegensatz zu den derzeit dafür verwendeten Gaskraftwerken) ermöglicht. Geeignete Geräte dafür sind etwa thermische Geräte (wie Klimaanlage oder Warmwasserspeicher), die grob unter dem Begriff „regelungsgetrieben“ zusammengefasst werden können [LS09]. Diese Geräteklasse zeichnet sich dadurch aus, dass der Betrieb durch Schwellenwerte gekennzeichnet ist, die das Gerät nicht verletzen darf. Bei einem zweipunktgeregelten Kühlschranks entspricht dies der oberen und der unteren Temperaturschranke, zwischen denen das Gerät zyklisch pendelt. In diesen Prozess kann eingegriffen werden, ohne die grundsätzliche Funktion des Gerätes oder den Komfort des Benutzers einzuschränken. Dies kann z. B. durch ein Steuersignal zum vorzeitigen Herunterkühlen vor Erreichen der oberen Temperaturschranke geschehen, wodurch effektiv eine Lastverschiebung vorgenommen wird [SKSV09]. Problematisch ist hierbei jedoch der erforderliche Koordinationsaufwand, da für einen signifikanten Effekt eine große Menge von Einheiten partizipieren muss, was prinzipiell negative Seiteneffekte wie beispielsweise Synchronisationen von Betriebszuständen (und damit die Entstehung von Schwingungen im Lastgang, siehe [HVS09]) mit sich ziehen kann. Das Einplanen einer großen Population von Akteuren ist somit trivial und stellt ein kombinatorisches Optimierungsproblem dar. Dieses ist bei Betrachtung mehrerer Planungsschritte (z. B. 24 Stunden in 96 Schritten) zudem multidimensional und bei Berücksichtigung von Präferenzen für bestimmte Signaltypen oder -zeiten zusätzlich multikriteriell, und kann bei steigender Problemgröße aufgrund seiner exponentiellen Berechnungskomplexität nicht mehr in der zur jeweiligen Planung verfügbaren Zeit optimal gelöst werden. Deshalb rücken hier vermehrt heuristische und auch sog. *anytime* Ansätze in den Fokus des Interesses. Solche Ansätze lassen sich prinzipiell in zentrale und verteilte Verfahren unterteilen. Das im vorliegenden Beitrag vorgestellte Dissertationsvorhaben hat zum Ziel, *selbstorganisierende Systeme* als Spezialfall der verteilten Verfahren auf ihre Eignung für dieses Optimierungsproblem zu untersuchen, übertragbare Konzepte zu identifizieren und schließlich ein Verfahren zu entwickeln, um das gestellte Problem mittels einer Selbstorganisationsstrategie zu lösen.

2 Selbstorganisation

Es existiert keine einheitliche Definition von Selbstorganisation (SO). Biologen verstehen darunter einen Prozess, der ein globales Muster ausschließlich mittels Interaktionen auf lokaler Ebene mit lokalen Informationen erzeugt, ohne Wissen um das globale Muster [CDF⁺01]. Im Bereich der Multiagentensysteme wird diese Beschreibung verfeinert und insbesondere zwischen SO und Emergenz unterschieden. So wird ersteres definiert als ein Mechanismus oder Prozess, der es einem System ermöglicht, sich zur Laufzeit ohne explizite externe Anweisungen zu (re)organisieren [SGK05]. Emergenz dagegen wird oft zusammengefasst als „das Ganze ist mehr als seine Teile“, bzw. etwas formaler: ein Phänomen, das bedingt durch Interaktionen der Systemelemente der Mikroebene auf der Makroebene eines Systems sichtbar wird, aber durch die Elemente der Mikroschicht

nicht intentional herbeigeführt wurde. Dieses Phänomen kann eine Struktur, ein Verhalten oder auch eine Funktionalität des Systems sein [SGK06]. Emergenz wird oftmals als eine inhärente Eigenschaft selbstorganisierender Systeme betrachtet. Dies muss nicht zwingend sein, wird aber im Folgenden so gehandhabt.

Bedingt durch vielfältige Vorgaben aus der Natur existiert eine Menge von Ausprägungen der SO. Dazu zählt einerseits die physikalische Sichtweise, welche maßgeblich von Hermann Haken unter dem Begriff Synergetik geprägt wurde und sich primär mit Wechselwirkungen auf Teilchenebene und der daraus resultierenden Strukturbildung beschäftigt [HW90]. Daneben existiert eine sozialwissenschaftliche Sichtweise, die soziale und gesellschaftliche Strukturen und Muster untersucht [HSKC06]. Die bekannteste Herangehensweise ist vermutlich aber die biologische – hier werden insbesondere komplexe dynamische Systeme aus der Natur betrachtet, wie etwa Insektenkolonien oder Schwarmverhalten [MBGG06]. Solche Systeme liefern Anhaltspunkte für die zugrunde liegenden Mechanismen, die es erlauben, mittels einfacher lokaler Aktionen und Interaktionen ein komplexes Systemverhalten zu produzieren. Dabei zeichnen sich diese Mechanismen insbesondere dadurch aus, dass das Systemziel unter Verwendung minimaler Ressourcen, d. h. mit einer sehr hohen Effizienz erreicht wird. Selbstorganisierende Systeme zeigen weitere vorteilhafte Eigenschaften, wie sie auch für das im Dissertationsvorhaben zu entwickelnde Koordinationsverfahren angestrebt werden. Einige davon sind (vgl. [SGK05]): **Adaptivität**, also die Anpassungsfähigkeit an veränderliche Umgebungen und Situationen. Dies ermöglicht es, den Notwendigkeiten einer Umkonfiguration sowohl bei Veränderungen im Gerätepark als auch im (bspw. saisonal bedingten) Verhalten der Geräte zu begegnen.

Robustheit gegenüber unerwarteten oder ungünstigen Bedingungen, beispielsweise um Ausfälle einzelner Geräte oder Komponenten des Systems auszugleichen.

Selbstheilung zur Möglichkeit der eigenständigen Wiederherstellung des Regelbetriebes nach großflächigen Störungen, wie etwa dem Ausfall des Kommunikationsnetzes.

Skalierbarkeit in Bezug auf die Menge der partizipierenden Akteure, um die gleichen Organisationsmechanismen bei gleichbleibender Effizienz unabhängig von der Anzahl der beteiligten Geräte verwenden zu können.

Dezentralität und damit das Fehlen einer (externen) zentralen Kontrolleinheit. Dadurch werden einzelne systemkritische Komponenten („single points of failure“) vermieden, deren Beeinträchtigung oder Ausfall den gesamten Systembetrieb gefährden würde.

Emergenz zur Nutzbarmachung des Systemverhaltens, etwa im Hinblick auf ein globales Optimierungsziel wie etwa dem Lastausgleich im betrachteten Netz.

3 Ziele

Der Rahmen der Arbeit ist die simulationsbasierte Untersuchung von Selbstorganisationsstrategien von ausgewählten Akteuren eines elektrischen Verteilnetzes mit dem Ziel eines möglichst weitgehenden Lastausgleichs bei minimierten Kosten bzw. CO₂-Emissionen. Dies ist insbesondere durch eine Lastverlagerung in Zeiträume höherer Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien und damit einer Reduktion des Bedarfs an Regelleistung

aus konventionellen Kraftwerken möglich. Um dies zu erreichen, sollen Selbstorganisationsverfahren basierend auf den in den verschiedenen Domänen bereits identifizierten Mechanismen (vgl. Literatur aus Abschnitt 2) erarbeitet und analysiert werden. Dazu zählt maßgeblich die Ausgestaltung der Kommunikationsform sowie der lokalen Verhaltensregeln der Akteure mit dem Ziel einer Koordinationsstrategie, die das betrachtete Optimierungsproblem des Lastausgleichs löst. Dabei gibt es grundlegend zwei verschiedene Ausrichtungen – die konkurrierenden und die kooperativen Interaktionen. In ersterem Fall stellen die Akteure *self-interested agents* dar, sie sind also egoistisch ausgerichtet. Dieser Ansatz findet insbesondere bei Marktmechanismen Anwendung. Diese wurden im Kontext des Demand Side Management schon vielfach untersucht, da zumeist von vollständig autonomen Akteuren ausgegangen wird, deren Interessen sich auf natürliche Weise von denen des Systembetreibers unterscheiden. So würde der Besitzer einer Klimaanlage diese primär nach ökonomischen sowie komfortbedingten Gesichtspunkten betreiben, welche ggf. im Gegensatz zu den Interessen des Energieversorgers in Form von Systemstabilität bei maximalem monetären Gewinn stehen. Da sich das Konzept der steuerbaren Lasten aber noch nicht breitflächig etabliert hat, sind auch andere Ansätze mit angepassten Geschäftsmodellen denkbar. Dazu zählt die kooperative Ausrichtung der Akteure, in welcher die lokalen Interessen den globalen teilweise oder ganz untergeordnet werden, oder sogar ihnen entsprechen. Aus Sicht des Autors des vorliegenden Beitrages ist die Betrachtung dieser Ausrichtung lohnenswert, da nicht-egoistische Interaktionen im Rahmen eines Optimierungsproblems unter Umständen bessere Ergebnisse erzielen können als egoistische (als einfaches Beispiel siehe das Gefangenendilemma). Daher wird im Folgenden von *kooperativen Akteuren* als Grundlage des zu entwerfenden Selbstorganisationsverfahrens ausgegangen. Ein dazugehöriges Geschäftsmodell könnte so aussehen, dass der Systembetreiber über die Freiheitsgrade der steuerbaren Lasten frei verfügen darf und ihren Besitzern dafür einen Pauschalbetrag zahlt. Dies ist rein exemplarisch und dient als Stützung der Festlegung auf kooperative Interaktionen – die Untersuchung von weiteren möglichen Geschäftsmodellen für kooperatives Demand Side Management wird in der angestrebten Dissertation nicht weiter betrachtet. Aus diesen Überlegungen ergibt sich folgendes Rahmenszenario:

Betrachtete Akteure des zu entwickelnden Systems sind nicht-steuerbare Erzeuger sowie steuerbare Verbraucher auf Ebene des Niederspannungsnetzes. Der Betrieb dieser Einheiten kann jeweils zu einem gewissen Grad prognostiziert werden. Aufgabe des Systems ist es, zu jedem Zeitpunkt basierend auf den je nach Verfügbarkeit dann aktuellsten Informationen (Prognosen, Betriebszustände und Einsatzpläne der Akteure) für jeden steuerbaren Akteur einen Einsatzplan zu erzeugen bzw. einen existierenden Einsatzplan anzupassen, der die von den regenerativen Erzeugern prognostizierte nachfolgende Einspeiseleistung optimal nutzt, sodass in der Summe die regenerativen Energien maximal ausgenutzt werden und sich dabei ein möglichst glatter Gesamtlastgang ergibt. Das System ist also dynamisch: langfristige Vorhersagen können kurzfristig wieder verworfen bzw. aktualisiert werden. Dieser Dynamik muss adaptiv begegnet werden. Der Planungshorizont richtet sich dabei nach den Möglichkeiten der jeweiligen Akteure sowie der Menge der zur Verfügung stehenden Einspeiseprognosen: ein großes Kühlhaus beispielsweise besitzt aufgrund seiner thermischen Masse mehr zeitliche Freiheitsgrade bezüglich der Einflussnahme auf den eigenen Betrieb als etwa die Klimaanlage für ein kleines Geschäft. Somit wird die Plan-

bildung auf jeweils individuellen Zeitskalen erfolgen. Dies geschieht durch die Akteure autonom – das zu entwickelnde Konzept soll also keine zentrale Planungsinstanz haben. Stattdessen besitzen die Akteure eine Menge von Verhaltensregeln, die auf Basis ihrer Wahrnehmungen die folgenden Aktionen bestimmen. Dazu ist insbesondere die Kommunikation und resultierend die Koordination mit anderen Akteuren des Systems erforderlich, um zu einem konsistenten Gesamteinsatzplan zu gelangen (Agenten können direkt miteinander kommunizieren und über Einsatzpläne verhandeln, sie könnten aber auch indirekt über Umweltmarker interagieren – siehe Stigmergie [MBGG06]). Es muss also eine Kombination aus Kommunikationsparadigma und Ausgestaltung der lokalen Verhaltensregeln der Akteure gefunden werden, welche dazu führt, dass die Akteure auf kooperative Weise und bei geringer Kommunikations- bzw. Berechnungskomplexität einen möglichst optimalen Gesamteinsatzplan bilden. Dies stellt die primäre Herausforderung des Dissertationsvorhabens dar.

Oftmals wird zufälliges Verhalten der Komponenten als Voraussetzung für selbstorganisierende Systeme betrachtet (vgl. [HW90]). In sicherheitskritischen Umgebungen sollten jedoch deterministische Mechanismen zum Einsatz kommen, um ein bestimmtes Systemverhalten garantieren zu können. Daraus ergibt sich die begleitende Fragestellung, inwieweit es möglich ist ein selbstorganisierendes Supply-Demand Matching ohne auf Probabilistik beruhende lokale Entscheidungen zu erreichen.

Die wesentliche Neuerung des hier zu untersuchenden Ansatzes gegenüber bestehenden Ansätzen zum Lastmanagement besteht also in der Kombination von proaktiven, planenden Agenten mit *sozialer Einstellung*, die (nach Möglichkeit deterministisch) miteinander interagieren, um sich gemeinsam an fluktuierende Einspeisungen anzupassen. Im Vergleich zu marktbasierter Verfahren streben die Agenten nicht ihren eigenen maximalen Gewinn an, sondern agieren kooperativ zu anderen Agenten, um auf diese Weise einen optimalen Betrieb des Gesamtsystems zu erreichen. Die zentrale Fragestellung des Dissertationsvorhabens lautet also:

Welche kooperativen Selbstorganisationsmechanismen sind prinzipiell für das beschriebene kombinatorische Optimierungsproblem sinnvoll anwendbar?

4 Verwandte Arbeiten

Li, Poulton und James vom CSIRO ICT Centre, Australien schlagen ein selbstorganisierendes System aus kooperierenden Resource Agenten vor [LPJ10]. Die Agenten, die je einen Verbraucher repräsentieren, kommunizieren indirekt über ein zentral gelagertes *Stigspace* (Stigmergie-Mechanismus). Zudem existiert ein Broker Agent als Schnittstelle zum externen Energiemarkt. Dieser definiert und veröffentlicht das globale Optimierungsziel in Form eines *supply cap*, also eines maximalen Energieverbrauches, für den Planungshorizont. Die Kooperation der Resource Agenten besteht darin, dass sie über das Stigspace die Lastprognosen anderer Agenten für die nächsten 30 Minuten sowie das globale Optimierungsziel auslesen und ihren eigenen Betrieb zielführend anpassen. Dies geschieht iterativ innerhalb eines Verhandlungsintervalls (5 Minuten) solange, bis das System kon-

vergiert (alle Betriebspläne sind lokal gültig und erfüllen zudem das globale Ziel soweit wie möglich) oder ein Abbruchkriterium in Kraft tritt. In welcher Form der eigene Betrieb adaptiert wird, ermittelt ein auf zufällig ausgewählten Lastverschiebungen basierender Algorithmus innerhalb der einzelnen Agenten. Das intervallbasierte, iterative, hierarchische Verfahren der Angebote zur Betriebsadaption stellt damit jedoch eine relativ starre Struktur dar, wie sie auch bei einigen Marktmechanismen im Bereich Demand Side Management zu finden ist.

Brazier, Pournaras et al. aus der Systems Engineering Group an der Delft University of Technology visieren das Ziel einer vollvernetzten, koordinierten Energieversorgung an, in welcher alle an der Erzeugung, am Transport sowie am Verbrauch beteiligten Teilsysteme mittels P2P-Mechanismen kommunizieren und eigenständig ein Supply-Demand Matching unter Berücksichtigung der Transportkapazitäten durchführen. Die Organisation der Systemkomponenten geschieht dabei mittels virtueller Baumstrukturen, die durch Overlay-Netze auf dem realen Kommunikationsnetz gebildet werden. Eine erste Implementierung in diesem Kontext liefert [PWB10]. Hier ist die Erzeugung der Baumstrukturen noch nicht enthalten, es werden daher statisch festgelegte Bäume für die Simulationen verwendet. Das System führt eine verteilte Berechnung für optimale Lastverschiebungspläne aller Verbraucher durch. Dies geschieht in einem iterativen bottom-up Algorithmus, in welchem die Knoten der virtuellen Baumstruktur alle möglichen Lastverschiebungen ihrer Kindknoten für den aktuellen Zeitpunkt erhalten, diese beliebig kombinieren und aus allen Kombinationen die besten auswählen und nach oben weiterreichen. Der Algorithmus endet mit dem Erreichen des Wurzelknotens der Gesamtstruktur, welcher anschließend einen broadcast an alle Teilnehmer sendet und damit die nächste Iteration für den Folgezeitschritt anstößt. Der vorgestellte Ansatz lässt jedoch einige Fragen offen, insbesondere hinsichtlich der Bildung der Baumstruktur, der Einbeziehung von Prognosen sowie der zeitlichen Skala des Prozesses.

Tröschel, Wissing und Nieße schlagen in [TWN09] ein produktoptimiertes dynamisches Virtuelles Kraftwerk (VK) vor. Unter einem VK ist ein Verbund von (Klein-)Erzeugern zu verstehen, der die Erzeugungskapazitäten der einzelnen Erzeuger aggregiert und nach außen als marktfähiger Erzeuger auftritt. Das von den Autoren vorgeschlagene dynamische VK arbeitet primär nach ökonomischen Gesichtspunkten und ist in einem holonischen Modell organisiert [HL04, Trö10]. Dieser vorgeschlagene Ansatz stützt sich rein auf Erzeuger und ist daher im Kontext des hier vorgestellten Dissertationsvorhabens nur am Rande zu betrachten. Interessant ist jedoch die adaptive, holonische Organisationsform der teilnehmenden Komponenten, da diese Struktur Merkmale selbstorganisierender Systeme aufweist.

Eine weitere Mischform aus selbstorganisierenden Akteuren und dem Konzept des Virtuellen Kraftwerks wird in der Dissertation von Kamper betrachtet [Kam10]. Der vorgestellte Ansatz versucht, Gruppierungen von Haushaltsgeräten und Blockheizkraftwerken zu bilden, welche durch dynamische Geräteeinsatzplanungen einen Lastausgleich innerhalb der Gruppe vornehmen können und gleichzeitig Regelpotenzial nach außen hin zur Unterstützung der Stundenreserve der Netzbetreiber anbieten. Die Kommunikation der Akteure wird durch ein P2P-Netz mit variabler Nachbarschaftsgröße realisiert. Die Gruppenbildung erfolgt über ein iteratives zweistufiges Verfahren, in welchem jeder Akteur

für jeden aktuellen Planungsschritt zunächst mittels eines evolutionären Algorithmus ausgehend von der P2P-Nachbarschaft mögliche Partnerschaften für einen Lastausgleich ermittelt, und innerhalb dieser potenziellen Partner dann durch eine lokale Suche geeignete Einsatzpläne identifiziert. Diese gehen dann als neue Nachbarschaft in die jeweils nächste Iteration des evolutionären Algorithmus ein, sofern der Prozess nicht durch vorgegebene Grenzen terminiert wurde. Offene Fragen an diesem Ansatz verbleiben im Bereich der Partnerschaftssuche: es ist nicht ersichtlich, wie die Nachbarschaft (und damit mögliche Gruppierungspartner) gebildet wird.

Eine zentrale Rolle in der Forschungslandschaft auf diesem Gebiet nimmt auch das DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1183 „Organic Computing“ ein, das sich nach sechs Jahren Laufzeit nun in der Abschlussphase befindet und unter dem Motto „*Move design time decisions to run time!*“ die sog. *kontrollierte Selbstorganisation* untersucht hat [MSSU11]. Ziele waren die Induktion von Prinzipien der Selbstorganisation ausgehend von natürlichen Systemen und die Übertragung dieser auf technische Systeme. Offen gebliebene Fragestellungen sind insbesondere im Bereich der Organisationsstrukturen von selbstorganisierenden Systemen zu finden. Dort wurde unter anderem Forschungsbedarf in Bezug auf vollständige Dezentralität vs. (Teil-)Zentralität identifiziert. Auch der Zusammenhang zwischen egoistischen und altruistischen Verhaltensweisen sollte nach Ansicht der Programmkoordinatoren weiter untersucht werden. In diesen Bereichen kann das vorgestellte Dissertationsvorhaben die Forschung auf dem Gebiet weiterführen.

5 Vorgehensweise

Um eine strukturierte Herangehensweise an die Entwicklung einer Strategie zum selbstorganisierten Lastausgleich zu ermöglichen, kann beispielsweise auf das Entwurfsmuster aus [SGK05] zurückgegriffen werden. Dies umfasst die Betrachtung der folgenden Punkte:

1. *Allgemeine Systembeschreibung*

Die allgemeine Beschreibung beinhaltet den Nutzen bzw. die Funktion des Systems, das angestrebte globale Ziel, die initialen Systemparameter sowie zur Laufzeit erforderliche Eingabedaten für das System.

2. *Umgebung des Systems*

Unter der Umgebung bzw. Umwelt des Systems werden solche Elemente verstanden, die unmittelbar die Funktion des modellierten Systems beeinflussen. Für das angestrebte System beinhaltet dies beispielsweise das Wetter, das Auswirkungen auf das Einspeiseverhalten dezentraler Erzeuger hat.

3. *Ereignisse*

Erfährt das System eine signifikante Änderung (zum Beispiel der Ausfall von Akteuren oder Teilen der Kommunikationsinfrastruktur), so kommt es zu Reaktionen innerhalb des Systems. In diesem Punkt werden mögliche Ereignisse aufgeführt und ihre Auswirkungen beschrieben.

4. *Autonome Entitäten*

In diesem Schritt werden die autonomen Einheiten des Systems detailliert beschrieben. Dies beinhaltet die einzelnen Akteursklassen sowie ihre jeweiligen Eigenschaften und Fähigkeiten im Kontext des Systems.

5. *Interaktionen im System*

Ohne zentrale Kontrolle wird das Systemverhalten maßgeblich durch Interaktion der beteiligten Akteure miteinander geformt. In diesem Schritt wird festgestellt, welche Interaktionen zwischen den Akteuren prinzipiell möglich sind, damit im folgenden Punkt dann darauf basierend eine Strategie zur Selbstorganisation entworfen werden kann.

6. *Selbstorganisationsmechanismus*

Nach den vorbereitenden Schritten 1.-5. ist nun der Mechanismus zur Selbstorganisation zu beschreiben. Dies kann etwa durch die Beantwortung der folgenden Fragen geschehen:

- Wodurch wird eine Reorganisation des Systems ausgelöst?
- Wirkt diese sich auf das ganze System oder nur auf bestimmte Teile aus?
- Wie sehen die einzelnen Schritte aus, die die Reorganisation produzieren?
- Welche Interaktionen zwischen Akteuren sind dabei involviert?
- Wodurch wird der Prozess der Reorganisation gestoppt?

Die Evaluation von möglichen, nach obigem Muster erarbeiteten Verfahren wird simulativ in einem Multiagentensystem geschehen und sich in den frühen Entwicklungsphasen auf die Lösungskonvergenz und -güte im Hinblick auf das separat berechnete exakte Optimum stützen, und später durch einen Vergleich mit bestehenden Ansätzen wie Marktmechanismen abgeschlossen werden.

6 Erste Lösungsansätze

Vorbereitend auf das obige Entwurfsmuster wurde eine Formalisierung des Problems vorgenommen und zusammen mit einem ersten selbstorganisierenden Koordinationsalgorithmus als *proof of concept* in [HVS11] vorgestellt. Abhängigkeiten zwischen einzelnen Zeitslots (z. B. die minimale Dauer gewählter Betriebsmodi) sowie individuellen Zeitskalen der Agenten werden zunächst nicht betrachtet, das Modell wurde an diesen Stellen also etwas vereinfacht. Im Folgenden werden die relevanten Aspekte der Veröffentlichung noch einmal kurz zusammengefasst.

Sei die maximale Granularität von möglichen Lastverschiebungsaktionen bekannt, dann kann die Zeit in äquidistante Slots $t \in \mathcal{T}$ diskretisiert werden. In Abschnitt 3 wurde als Ziel des Systems ein möglichst glatter Lastgang bei hoher Ausnutzung der regenerativen Energien beschrieben. Dies lässt sich hier abbilden, indem eine Funktion $g : \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}$ definiert wird, welche einen nachzufahrenden Ziellastgang darstellt. Da auch Erzeuger als

Akteure betrachtet werden, stellt der einfachste Fall $g(t) = 0 \forall t \in \mathcal{T}$ einen perfekten Ausgleich von Einspeisung und Last dar. Aufgabe der insgesamt n Agenten im System, welche durch die Menge $\mathcal{A} = \{a_i \mid 0 \leq i < n\}$ definiert sind, ist es nun, ihren eigenen Betrieb dahingehend zu planen, dass in der Summe der vorgegebene Ziellastgang produziert wird. Das bedeutet die Agenten a_i repräsentieren elektrische Akteure, welche für einen Zeitslot t jeweils eine begrenzte Menge von m_i möglichen Betriebsmodi $\mathcal{P}_i(t)$ besitzen, aus denen sie wählen können. Diese sind durch die Menge

$$\mathcal{P}_i(t) = \{(p, r)_k \mid 0 \leq k < m_i\}$$

definiert, wobei $p = p_{i,k}(t)$ einen Betriebsmodus in Form von elektrischer Leistung (die über das zugeordnete Zeitintervall t konstant ist) beschreibt. Zusätzlich definiert $r = r(p_{i,k}(t))$ eine Bewertung dieses Betriebsmodus hinsichtlich spezifischer Geräte Kriterien (wie beispielsweise Effizienz oder auch Nutzerpräferenzen), welche als Auswahlkriterium in die Wahl eines Betriebsmodus mit einfließen kann.

Seien nun die in einem Zeitslot t gewählten Betriebsmodi (genau einer pro Agent) mit $s(t)$ bezeichnet:

$$s(t) = (y_0, \dots, y_n), \quad y_i \in \mathcal{P}_i(t)$$

Dann beschreibt die Matrix $s(\mathcal{T})$ eine Aggregation aller $s(t)$ über \mathcal{T} und stellt eine *Lösung* des Problems dar. Der gesamte Lösungsraum aller möglichen Kombinationen von Betriebsmodi über alle Zeitslots ist dann durch

$$\mathcal{S} = \prod_{t \in \mathcal{T}} \prod_{i \in \mathcal{A}} \mathcal{P}_i(t)$$

gegeben. Unter der vereinfachenden Annahme, dass alle Agenten gleichviele Betriebsmodi zur Auswahl haben (sodass $\forall i \in \mathcal{A} : m_i = m$), kann die Größe des Lösungsraumes durch

$$|\mathcal{S}| = m^{n \cdot |\mathcal{T}|}$$

bestimmt werden und wächst somit exponentiell mit der Populationsgröße sowie dem betrachteten Zeitraum. Um nun die Güte einer Lösung bestimmen zu können, werden Metriken zur Bewertung von Lösungsvektoren sowie zur Bewertung von Lösungen benötigt. Die Aufstellung dieser Metriken wird ein eigener Arbeitsschritt im Dissertationsvorhaben darstellen, für den jetzigen Zeitpunkt werden exemplarische Metriken angenommen. Sei

$$f(g(t), s(t)) = \bar{r}_{s(t)} \cdot \left| \left(\sum_{p \in s(t)} p \right) - g(t) \right|$$

mit

$$\bar{r}_{s(t)} = \frac{\sum_{r \in s(t)} r}{n}$$

eine Gütefunktion zur Bewertung eines Vektors $s(t)$, welche die Differenz der aufsummierten elektrischen Leistungen der gewählten Betriebsmodi und der Zielfunktion zum betrachteten Zeitpunkt t berechnet, und diese Differenz durch das über alle gewählten Betriebsmodi gemittelte Bewertungsmaß r der einzelnen Agenten (siehe Definition von

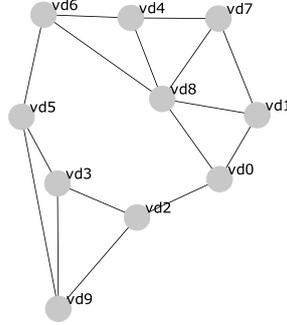


Abbildung 1: Exemplarische Nachbarschaftsbeziehungen basierend auf räumlicher Nähe.

$\mathcal{P}_i(t)$ gewichtet. Dann kann eine Funktion F zur Bewertung aller f über \mathcal{T} (und damit der Bewertung von $s(\mathcal{T})$) definiert werden:

$$F(g, s) = \sum_{t \in \mathcal{T}} f(g(t), s(t))$$

Das resultierende Optimierungsproblem ist somit durch

$$s_{opt} = \underset{s}{\operatorname{argmin}} (F(g, s))$$

gegeben. Das Ziel ist es hier also, diejenige Lösung $s_{opt}(\mathcal{T})$ zu bestimmen, welche die Bewertungsfunktion F minimiert. Wie eingangs beschrieben ist eine solche Lösung nicht leicht zu finden, dies wird durch die Größe des exponentiell wachsenden Lösungsraumes deutlich.

Ein erster selbstorganisierender Ansatz zur Lösung dieses Optimierungsproblems basiert auf der Definition einer lokalen Nachbarschaft eines jeden Agenten, welche die Menge der möglichen Kommunikations- und Interaktionspartner beschränkt. Sei eine solche Nachbarschaft in Form eines Graphen $G = (\mathcal{A}, \mathcal{E})$ gegeben, dann sei \mathcal{N}_i mit

$$\forall a_i \in \mathcal{A} \forall a_j \in \mathcal{N}_i : (a_i, a_j) \in \mathcal{E}, \mathcal{N}_i \subseteq \mathcal{A}, a_i \neq a_j$$

die Menge der möglichen Kommunikationsverbindungen eines Agenten a_i zu anderen Agenten. Ein möglicher Nachbarschaftsgraph basierend auf räumlicher Nähe ist exemplarisch in Abbildung 1 dargestellt. Mit \mathcal{N}_i ist es nun möglich, eine lokale Sicht der Agenten auf das Optimierungsproblem zu definieren:

$$s_i(t) = (y_{i_0}, \dots, y_{i_i}), \quad y_{i_j} \in \mathcal{P}_j(t), a_j \in \mathcal{N}_i \cup \{a_i\}$$

Dieser Vektor beinhaltet (im Vergleich zu $s(t)$) in Bezug auf einen Zeitpunkt t nur die gewählten Betriebsmodi genau derjenigen Agenten, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft des Agenten a_i befinden, sowie seiner eigenen Auswahl. Auf Basis dieser lokalen Sicht auf das System versuchen die Agenten nun, lokal optimale Lösungen hinsichtlich des bekannten globalen Ziellastganges zu produzieren. Dazu wählen sie ihre Betriebsmodi derart, dass der sich innerhalb der für sie sichtbaren Nachbarschaft ergebende Lastgang

möglichst nah am Ziellastgang liegt. Der Selbstorganisationsmechanismus ist nun dadurch gegeben, dass eine Änderung eines gewählten Betriebsmodus eines Agenten von seinen Nachbarn wahrgenommen wird. Die Nachbarn werden daraufhin selbst aktiv und führen eine Neubewertung ihrer jeweiligen lokalen Sicht durch und passen ihre Auswahl ggf. an die neue Situation an. Auf diese Weise löst die Umplanung eines einzelnen Agenten eine Aktivierung seiner Nachbarn aus, welche sich dann kaskadierend durch das gesamte Netz bewegt, wobei jede Umplanung eines Agenten eine erneute Aktivierung seiner Nachbarn bewirkt. Erst wenn kein Agent seine Auswahl in Bezug auf seine lokale Sicht weiter verbessern kann, erreicht das System einen stabilen Zustand.

Ob eine solche Stabilisierung eintritt, kann jedoch für diesen prototypischen Algorithmus derzeit nicht garantiert werden. Ein weiteres Problem an diesem Ansatz ist, dass es sich um ein Greedy-Verfahren handelt, welches sich ggf. in einem suboptimalen Zustand stabilisieren kann. Um dem entgegenzuwirken, wurde bei der Adaption der Betriebsmodi eine Tabusuche eingeführt. Diese ermöglicht es den Agenten, suboptimale stabile Konfigurationen wieder zu verlassen und die Suche nach optimalen Lösungen fortzuführen. Aufgrund der vollständigen Dezentralität des Systems und dem begrenzten Wissen der Agenten sind diese allerdings nicht in der Lage, global optimale Zustände als solche zu erkennen. Eine verbleibende offene Frage ist daher, wie ein Terminierungskriterium aussehen kann, welches die Agenten in die Lage versetzt, in einem verteilten System mit begrenztem Wissen global „gute“ bzw. optimale Zustände zu erkennen.

7 Ausblick

Das im vorigen Abschnitt beschriebene Verfahren ist ein erster Ansatz für ein selbstorganisiertes Supply-Demand Matching. Aufbauend auf diesem Ansatz und unter Zuhilfenahme des zuvor vorgestellten Entwurfsmusters für selbstorganisierende Systeme soll im Verlauf des Promotionsvorhabens untersucht werden, inwiefern es mit kooperativen Selbstorganisationsstrategien möglich ist, das gegebene Optimierungsproblem bei geringer Berechnungs- bzw. Kommunikationskomplexität im Vergleich zu bekannten Verfahren wie Marktmechanismen zu lösen. Dabei werden die Fragestellungen der Terminierung eines solchen Verfahrens (siehe voriger Abschnitt), der Konvergenz der Lösungsfindung (welche bei heuristischen Ansätzen nicht per se gegeben ist) sowie der Robustheit des Systems betrachtet. Die Evaluierung der entwickelten Verfahren wird simulativ in einem Multiagentensystem geschehen und sich neben den soeben angesprochenen theoretischen Betrachtungen auf einen Vergleich mit bestehenden Ansätzen stützen.

Literatur

- [CDF⁺01] S. Camazine, J.-L. Deneubourg, N.R. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz und E. Bonabeau. *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press, 2001.
- [GC88] C. Gellings und J. Chamberlin. *Demand-Side Management: Concepts And Methods*.

The Fairmont Press, Inc., 1988.

- [HL04] B. Horling und V. Lesser. A survey of multi-agent organizational paradigms. *The Knowledge Engineering Review*, 19(4):281–316, 2004.
- [HSKC06] L. Hassas, G.D. Serugendo, A. Karageorgos und C. Castelfranchi. On Self-Organising Mechanisms from Social, Business and Economic Domains. *Informatica*, 30:63–71, 2006.
- [HVS09] C. Hinrichs, U. Vogel und M. Sonnenschein. Modelling and Evaluation of Desynchronization Strategies for Controllable Cooling Devices. In I. Troch und M. Breitenecker, Hrsg., *Proc. Mathmod 2009 - 6th Vienna International Conference on Mathematical Modelling. Argesim Report No. 35 (on CD-ROM)*, Wien, 2009.
- [HVS11] C. Hinrichs, U. Vogel und M. Sonnenschein. Approaching Decentralized Demand Side Management via Self-Organizing Agents. In Yolum, Tumer, Stone und Sonenberg, Hrsg., *ATES Workshop, Proc. of 10th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011)*, Teipeh, Taiwan, 2011.
- [HW90] H. Haken und A. Wunderlin. *Synergetik: Eine Einführung. Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie*. Springer, 1990.
- [Kam10] A. Kamper. *Dezentrales Lastmanagement zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen im Stromnetz*. Universität Karlsruhe Universitätsbibliothek, Karlsruhe, 2010.
- [LPJ10] J. Li, G. Poulton und G. James. Coordination of Distributed Energy Resource Agents. *Journal of Applied Artificial Intelligence*, 24(5):351–380, 2010.
- [LS09] O. Lünsdorf und M. Sonnenschein. Lastadaption von Haushaltsgeräten durch Verbundsteuerung. In M. Kurrat, Hrsg., *Tagungsband zum 3. Statusseminar des FEN, FEN Symposium Dezentrale Energiesysteme*, Oldenburg, 2009.
- [MBGG06] J.-P. Mano, C. Bourjot, L. Gabriel und P. Glize. Bio-inspired Mechanisms for Artificial Self-organised Systems. *Informatica*, 30:55–62, 2006.
- [MSSU11] C. Müller-Schloer, H. Schmeck und T. Ungerer. *Organic Computing - A Paradigm Shift for Complex Systems*. Birkhäuser, Basel, 2011.
- [PWB10] E. Pournaras, M. Warnier und F.M.T. Brazier. Local Agent-based Self-stabilisation in Global Resource Utilisation. *International Journal of Autonomic Computing*, 2010.
- [SGK05] G.D. Serugendo, M-P. Gleizes und A. Karageorgos. Self-organisation in multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*, 20(2):65–189, 2005.
- [SGK06] G.D. Serugendo, M-P. Gleizes und A. Karageorgos. Self-Organisation and Emergence in MAS: An Overview. *Informatica*, 30:45–54, 2006.
- [SKSV09] M. Stadler, W. Krause, M. Sonnenschein und U. Vogel. Modelling and Evaluation of Control Schemes for Enhancing Load Shift of Electricity Demand for Cooling Devices. *Environmental Modelling and Software*, 24:285–295, 2009.
- [Trö10] M. Tröschel. *Aktive Einsatzplanung in holonischen Virtuellen Kraftwerken*. OIWiR Verlag, Edewecht, 2010.
- [TWN09] M. Tröschel, C. Wissing und A. Nieße. Optimierte Produktauswahl und adaptive Reorganisation in dynamischen Virtuellen Kraftwerken. In M. Kurrat, Hrsg., *Tagungsband zum 3. Statusseminar des FEN, FEN Symposium Dezentrale Energiesysteme*, Oldenburg, 2009.