

# Naturinspirierte Verfahren für eine nachhaltige Stromversorgung

Michael Sonnenschein, Ute Vogel<sup>1</sup>

## Inhalt

Naturinspirierte Verfahren für eine nachhaltige Stromversorgung .....	1
1 Herausforderungen der nachhaltigen Energieversorgung.....	2
2 Naturinspirierte Verfahren.....	4
2.1 Heuristische Optimierungsverfahren .....	5
2.2 Organic Computing.....	6
2.2.1 Beispiel: Fischschwarm .....	6
3 Aufgaben in der Stromversorgung und mögliche Lösungsverfahren .....	7
3.1 Anwendung naturinspirierter Optimierungsheuristiken .....	7
3.1.1 Genetische Algorithmen .....	7
3.1.2 Ant Colony Verfahren .....	9
3.2 Organic Computing.....	11
3.2.1 Selbstorganisierte Verbraucher-Cluster .....	13
4 Zusammenfassung .....	14
5 Literatur.....	15

## Zusammenfassung

Die Integration erneuerbarer Energien stellt neue Anforderungen an das bislang hierarchisch organisierte Stromversorgungssystem, da Energiequellen, wie die solare Einstrahlung oder das Windaufkommen nicht steuerbar sind und die Stromerzeugung von Photovoltaik- und Windenergieanlagen nur mit einer restlichen Unsicherheit vorhergesagt werden können. Eine mögliche Maßnahme zur Verminderung der sich hieraus ergebenden Probleme besteht in der Ausnutzung von Lastverschiebungspotenzialen auf Seiten der Stromverbraucher, d.h. einer optimalen Anpassung von Stromerzeugung und -verbrauch. In diesem Beitrag werden Arbeiten vorgestellt, die untersuchen, wie mit naturinspirierten Verfahren eine solche Lastanpassung vorgenommen werden kann.

---

<sup>1</sup> Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 26129 Oldenburg

## 1 Herausforderungen der nachhaltigen Energieversorgung

Spätestens seit der von der Bundesregierung beschlossenen Energiewende ist klar, dass das Energie- und speziell das Stromversorgungssystem vor großen Herausforderungen stehen. Eine Stromversorgung auf der Grundlage erneuerbarer Energien erfordert für das Stromnetz in mehrfacher Hinsicht Anpassungen:

- Die Erzeugung von Strom erfolgt nicht, wie bisher, auf der Hoch- und Höchstspannungsebene, sondern auch auf der Mittel- und Niederspannungsebene. Da Strom bisher nur „von oben nach unten“ über die Spannungsebenen verteilt wurde, ist auf den unteren Spannungsebenen aber derzeit so gut wie keine Steuerungsmöglichkeit vorhanden. Dies muss sich nun aber ändern, um die Einspeisung aus Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen und Blockheizkraftwerken mit dem Verbrauch in den Mittel- und Niederspannungsnetzen abzustimmen. Hierbei muss sichergestellt sein, dass Erzeugung bzw. Einspeisung „von oben“ und Verbrauch zu jedem Zeitpunkt übereinstimmen, um Netzparameter wie Frequenz und Spannung in den gegebenen Toleranzen halten zu können.
- Die Einspeisung regenerativ erzeugten Stroms erfolgt in Abhängigkeit von aktuellen Witterungsbedingungen (Windstärke, Solareinstrahlung) und kann daher nicht oder nur schwer gesteuert werden. Zudem ist die Prognose der zu Einspeisung aus solchen Quellen stets mit Unsicherheiten verbunden, was zu einem zusätzlichen Bedarf an sogenannter Regelenergie führt, die zum Ausgleich von Schwankungen in der Einspeisung (oder von unvorhergesehenen Schwankungen im Verbrauch) erforderlich ist.
- Schließlich erfolgt die Einspeisung aus regenerativen Quellen nicht immer dort, wo Strom auch (lokal) benötigt wird, was die Durchleitung von Strom auf neuen Wegen erforderlich macht. Durch eine (regionale) Überproduktion auf den unteren Spannungsebenen entsteht zudem nicht nur das Problem einer höheren Netzbelastung; auf die hierdurch mögliche Lastumkehr ist das derzeitige Strommanagement wenig vorbereitet.

Eine ganz zentrale Herausforderung ist damit der Ausgleich zwischen der fluktuierenden Einspeisung aus regenerativen Quellen und dem prognostizierten Verbrauch. Dazu gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten:

- *Bereitstellung von sogenannten Schattenkraftwerken, die die Versorgung übernehmen, wenn nicht genügend Strom aus regenerativen Quellen zur Verfügung steht*

Diese Möglichkeit erfordert Investitionen in Kraftwerke, die nur selten betrieben werden und ist daher weder ökonomisch noch ökologisch attraktiv.

- *Bereitstellung von Speicherkapazitäten für Energie*

Die Speicherung von Strom in direkter Form ist derzeit nur mit sehr hohem Kostenaufwand möglich und kann daher nur für kleine Energiemengen erfolgen, die kurzzeitig zur Verfügung gestellt werden können. Mit Elektrofahrzeugen kann sich diese Situation etwas verbessern, jedoch sind auch deren Batterien nicht zur Zwischenspeicherung großer Energiemengen – etwa zur Überbrückung einer einwöchigen Flaute - in der Lage. Für größere Energiemengen bedarf es anderer Lösung, wie etwa die Umwandlung von Strom in Wasserstoff oder Methan, was einfacher und kostengünstiger gespeichert werden kann. Dies ist derzeit Gegenstand der Forschung.

- *Anpassung von Verbrauchern an eine fluktuierende Einspeisung*

Die Verschiebung von Stromverbrauch in Zeiten, in denen die Stromerzeugung den Stromverbrauch übersteigt, soll eine effizientere Ausnutzung der natürlichen Ressourcen und eine Verminderung von Regelenergie bewirken. Dies ist für Großverbraucher schon in einigen Branchen Stand der Technik – für kleinere Verbraucher ist eine solche Möglichkeit aus Kostengründen bisher nicht genutzt worden, wird jedoch mit den Herausforderungen der Energiewende zunehmend attraktiver. Der Fokus dieses Beitrags liegt daher auf dieser Möglichkeit.

Eine wesentliche Anforderung besteht also darin, auf der Mittel- und Niederspannungsebene des Stromnetzes viele kleine Erzeuger und Verbraucher in eine Steuerung so zu integrieren, dass das Netz insgesamt stabil bleibt. Hierzu sind aber neue, dezentrale Steuerungs- und Optimierungsverfahren zu entwickeln, da eine Einbindung all dieser Akteure in die bisherige zentrale Steuerung aus Komplexitätsgründen nicht mehr erfolgversprechend ist.

Neben dem Ausgleich der sogenannten Wirkleistung in den einzelnen Abschnitten eines Netzes bedarf es zur Spannungsstabilisierung ggf. auch noch des Ausgleichs von Blindleistung – dies ist jedoch nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit.

## 2 Naturinspirierte Verfahren

Als „komplex“ werden in der Informatik Probleme bezeichnet, deren Lösungsraum so groß werden kann, dass eine exakte oder optimale Lösung nicht in akzeptabler Zeit bestimmt werden kann. Seit den 80er Jahren wurden erste Lösungsheuristiken für solche Optimierungsprobleme entwickelt, deren Grundidee von Prozessen in natürlichen Systemen inspiriert ist. Eines der ersten dieser Optimierungsverfahren, das „Simulated Annealing“ von S. Kirkpatrick et al. (1983), beruht beispielsweise auf materialwissenschaftlichen Untersuchungen von Abkühlungsprozessen und der Erkenntnis, dass die Anordnung von Atomen durch den Temperaturverlauf des Abkühlungsprozesses beeinflusst werden kann. Seit den 90er Jahren (vgl. D. Goldberg, 1989, M. Dorigo, 1992) wurden verstärkt Verfahren untersucht, die ihre Wurzeln in biologischen Systemen haben, wie etwa die „Genetischen“ oder „Evolutionären Algorithmen“, deren Lösungsverfahren auf dem Vorbild der biologischen Evolution beruht, oder Ameisenkolonie-Verfahren, die das Futtersuche-Verhalten natürlicher Ameisen nachbilden.

Den hier betrachteten natürlichen Systemen ist dabei gemeinsam, dass sie über eine große Anzahl sehr einfacher und gleich strukturierter Akteure verfügen, deren emergentes Zusammenwirken zu einer globalen Lösung eines kollektiven Ziels führt, die oftmals dicht beim globalen Optimum liegt. Beispielsweise führt eine genügend langsame Abkühlung zu größeren und homogeneren Kristallen. Evolutionäre Prozesse tragen dazu bei, dass Populationen entstehen können, die nahezu optimal an ihren Lebensraum angepasst sind. Ameisenkolonien hingegen sind trotz der beschränkten Weltsicht einzelner Ameisen in der Lage einen sehr kurzen Weg zwischen Futterquelle und Ameisennest zu bestimmen. Die informationstechnische Nachbildung solcher Prozesse führte zu heuristischen Optimierungsverfahren, die in akzeptabler Zeit eine (suboptimale) Lösung für sehr komplexe Probleme ermitteln können. Solche Optimierungsverfahren werden in Abschnitt 2.1 am Beispiel der genetischen Algorithmen und der Ant Colony-Verfahren näher vorgestellt.

In den letzten 10-15 Jahren hat die Komplexität gesteuerter technischer Systeme stark zugenommen: ein technisches System, wie beispielsweise ein Verkehrssystem, besteht aus einer Vielzahl unabhängiger Komponenten (wie z.B. Sensoren, Lichtzeichenanlagen, Verkehrsteilnehmer,...), die zur Erreichung eines gemeinsamen Zieles, nämlich der Optimierung des Verkehrsflusses, interagieren

müssen. Auch bei der Modellierung der hierzu benötigten Interaktionsstrategien werden unter dem Paradigma „Organic Computing“ zunehmend Analogien zu natürlichen Systemen ausgenutzt. Die möglichen und zur Modellierung technischer Systeme sinnvollen Analogien sind hierbei sehr vielfältig und von der spezifischen Problematik abhängig, so dass noch keine vereinheitlichende Theorie dazu besteht und diese hier an dem relativ einfachen Beispiel „Fischschwarm“ motiviert werden.

## 2.1 Heuristische Optimierungsverfahren

Die Herausforderung bei Optimierungsaufgaben besteht in vielen Fällen darin, in einem sehr großen Suchraum eine optimale Lösung zu finden. Der Suchraum der (zulässigen) Lösungen wird hierbei durch eine Menge von Randbedingungen (Constraints) eingeschränkt, die dazu führen können, dass der Raum eine sehr komplexe Struktur annimmt. Hinzu kommt, dass auch die Zielfunktion, die die Güte einer Lösung bestimmt, sehr komplex sein kann. Da exakte Lösungsverfahren zur Berechnung der optimalen Lösung in der Regel besondere Anforderungen an Lösungsraum oder die Zielfunktion stellen, können sie in vielen Fällen nicht eingesetzt werden. Wenn der Suchraum so groß ist, dass eine Aufzählung und Prüfung aller möglichen Lösungen zeitlich nicht akzeptabel ist, bieten Heuristische Optimierungsverfahren einen Kompromiss. Durch eine „intelligente“ Suchstrategie erforschen diese den Lösungsraum und fokussieren die Suche relativ schnell auf „vielversprechende“ Teilräume.

Zur Exploration des Suchraums werden häufig Methoden eingesetzt, die von solchen natürlichen Vorgängen inspiriert sind, in denen eine große Menge gleichartiger Individuen zusammenwirken, wie beispielsweise Evolutionäre Prozesse und Ameisenkolonien: Die aus solchen Prozessen entwickelten Lösungsheuristiken identifizieren Individuen mit Lösungen im Suchraum. Sie starten zumeist mit einer Population von Individuen, die den Lösungsraum möglichst gut abdecken. Die Zielfunktion bewertet die Güte jedes Individuums und stellt somit ein Feedback der Umwelt auf die Population dar, das sich auf die Bildung der Folgepopulation auswirkt. In der Regel bewirkt dies, dass die Folgepopulation eine bessere Bewertung erreicht und sich somit in Richtung Optimum entwickelt, auch wenn ein Erreichen des globalen Optimums nicht garantiert werden kann.

Da die einzelnen Individuen als vollständige Lösungen im Lösungsraum existieren

und diesen Raum unabhängig voneinander aufgrund lokaler Informationen erforschen, sind solche Verfahren meist auch gut parallelisierbar.

Eine anwendungsorientierte Einführung in heuristische Optimierungsverfahren findet sich in (Michalewicz, Fogel, 2000).

## 2.2 Organic Computing

Das Gebiet „Organic Computing“ befasst sich mit Ansätzen zur Modellierung von Technischen Systemen, die aus interagierenden autonomen Komponenten zusammengesetzt sind. Der Begriff „Organic“ bezieht sich darauf, dass für solche Systeme bzw. die Interaktion ihrer Komponenten „lebensähnliche“ Eigenschaften wie Selbstorganisation, Selbstkonfiguration, Selbstheilung, Selbstadaption usw. wünschenswert sind, die bei natürlichen Systemen beobachtet werden können. Daher werden unter „Organic Computing“ naturinspirierte Konzepte und Verfahren verstanden, die zur Konstruktion und Beherrschung Technischer Systeme eingesetzt werden können. Anhand des folgenden Beispiels eines Fischeschwarms soll verdeutlicht werden, wie sich die gewünschte Systemeigenschaft „Selbstorganisation“ als emergenter Effekt bei der Interaktion von sehr einfachen Individuen ergeben kann. Ein Überblick über das Gebiet des Organic Computing findet sich in (Müller-Schloer et al., 2011).

### 2.2.1 Beispiel: Fischeschwarm

Untersuchungen zum Bewegungsverhalten eines Fischeschwarms (A. Huth und C. Wissel, 1992) haben gezeigt, dass die Bildung eines Fischeschwarms auf drei sehr einfache Verhaltensregeln der einzelnen Fische zurückgeführt werden kann:

- Abstoßungsbereich: Ändere die eigene Bewegungsrichtung so, dass Kollisionen mit Objekten im Nahbereich vermieden werden.
- Parallelbereich: Passe die eigene Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit den Fischen im Parallelbereich an.
- Anziehungsbereich: Ändere die eigene Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit so, dass weiter entfernte Fische im Sichtbarkeitsbereich angestrebt werden.

Die neue Gesamtrichtung und -geschwindigkeit eines Fisches ergibt sich als

Mittelwert der jeweiligen Einzelrichtungen.

Durch diese sehr simplen Regeln formt sich ohne zentrale Einwirkung oder Kontrolle das System „Fischschwarm“ als emergentes Phänomen. Dieses verhält sich Störungen gegenüber sehr robust, ist also nicht nur selbstorganisiert, sondern (beispielsweise dem Auftauchen von Raubfischen) auch selbstheilend, d.h. funktioniert auch bei Wegfall einiger Individuen problemlos weiter.

### **3 Aufgaben in der Stromversorgung und mögliche Lösungsverfahren**

Wie bereits in der Einleitung angesprochen, entstehen in einem Smart Grid zum Management von Stromerzeugung und –verbrauch in einem Verteilnetz komplexe Steuerungs- und Optimierungsaufgaben. Im Folgenden sollen daher zwei Anwendungen naturinspirierter Optimierungsheuristiken zur Lastadaption in Bezug auf fluktuierende Stromeinspeisungen sowie ein Organic Computing-Modell zur Clusterbildung von Verbrauchern vorgestellt werden, die in der Arbeitsgruppe der Autoren dieses Beitrags untersucht wurden.

#### **3.1 Anwendung naturinspirierter Optimierungsheuristiken**

Zur Lastadaption bei Stromverbrauchern wurden in der Arbeitsgruppe der Autoren mehrere Verfahren der heuristischen Optimierung untersucht (Vogel et al., 2006; Sonnenschein, M et al., 2006; Müller, 2006), von denen hier zwei auf Genetischen Algorithmen und auf Ant Colony Optimization beruhende Ansätze vorgestellt werden.

##### **3.1.1 Genetische Algorithmen**

In (U. Vogel, J. Pei und M. Sonnenschein, 2006) wurde zur Lastadaption ein auf Genetischen Algorithmen basierender Lösungsansatz am Beispiel von programmgesteuerten Haushaltsgeräten untersucht. Programmgesteuerte Haushaltsgeräte sind Geräte, wie beispielsweise Waschmaschinen oder Wäschetrockner, die bis auf die initiale Auswahl eines Programms für ihre Durchführung keine weitere Benutzerinteraktionen erfordern. Aktivierungen solcher Geräte lassen sich vereinfacht als „Jobs“ mit konstanter Dauer und Verbrauch beschreiben. Geht man davon aus, dass für jeden Job ein Zeitintervall gegeben ist, indem dieser ausgeführt werden muss und jedes Gerät zu einem beliebigen

Zeitpunkt seines Zeitintervalls automatisch aktiviert werden kann, kann durch die optimale Auswahl von Startzeitpunkten einer ausreichend großen Menge solcher Geräte eine Lastanpassung erreicht werden.

Die Optimierungsaufgabe besteht somit darin, bei gegebener Leistungskurve  $supply(t)$  für jeden Job  $j$  einen Startzeitpunkt  $s(j)$  unter Einhaltung der zulässigen Aktivierungsintervalle jedes Jobs so zu bestimmen, dass die (Euklidische) Distanz zwischen Verbrauch  $demand(t)$  und Einspeisung  $supply(t)$  minimal wird. Zur Modellierung dieses Problems mit Hilfe genetischer Algorithmen wird der Vektor aus Startzeiten für jeden Job als Chromosomen eines Individuums der Vektor gespeichert. Jede Startzeit muss zulässig sein, d.h. die aus den zulässigen Aktivierungsintervallen resultierenden zeitlichen Constraints des zugehörigen Jobs beachten. Die Startpopulation besteht aus  $n$  Individuen, deren Chromosomen jeweils zufällige, aber zulässige Werte enthalten. Die Güte (Fitness) eines Individuums berechnet sich durch die Distanz zwischen der resultierenden Verbrauchskurve aller Jobs und der Angebotskurve. Der Rekombinationsoperator teilt die Chromosomen  $C_A, C_B$  zweier Individuen A und B an einer zufällig gewählten Position  $i$  und kombiniert die Teile  $C_{A1}, C_{A2}, C_{B1}, C_{B2}$  zu neuen Chromosomen  $(C_{A1}, C_{B2}), (C_{A2}, C_{B1})$ , die auch wieder zulässige Lösungen sind. Beim Mutationsoperator wird das Chromosom eines Individuums an einer zufällig gewählten Position auf einen neuen Wert gesetzt, wobei hier das Aktivierungsintervall des zugehörigen Jobs beachtet werden muss. Zur Selektion der Individuen für die Folgegeneration werden die  $n$  Individuen gewählt, die die beste Fitness aufwiesen.

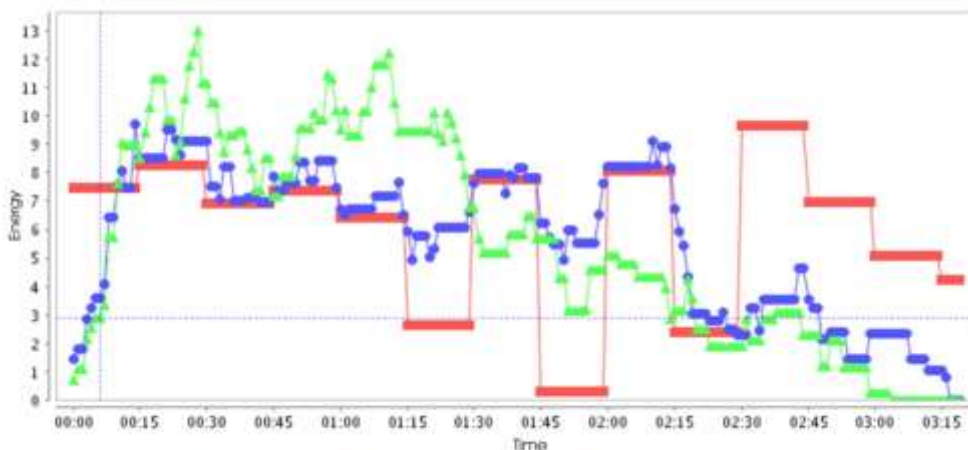


Abbildung 1: Mittels Genetischer Algorithmen angepasste Last bei 60 Tasks in einem Zeitintervall von 200 Zeiteinheiten (ca. 3,3 h)



Das Verfahren lieferte auch bei größeren Mengen von Geräten bzw. Jobs in relativ kurzer Zeit eine gute Adaption der Last- an die Angebotskurve. Abb. 1 zeigt den Verlauf der Einspeisung sowie ungesteuerten und optimierten Verbrauch auf einem Zeitintervall von 200 Zeiteinheiten bei 60 zufällig erzeugten Jobs und einer zufällig generierten Angebotskurve. Durch die einschränkenden Constraints konnte die (euklidische) Differenz zwischen Stromeinspeisung und Verbrauch in den untersuchten Beispielszenarien um ca. 30-40% verringert werden.

### 3.1.2 Ant Colony Verfahren

Eine intelligente Steuerung einer größeren Menge von Klimaanlage kann ebenfalls zu einer effizienteren Ausnutzung fluktuierender Einspeisung genutzt werden: In (Müller, 2006) wurde ein Experimentiersystem zur vergleichenden Untersuchung von Optimierungsheuristiken zur Lastanpassung entwickelt. Am Beispiel der Steuerung von Klimaanlage wurde die Verwendung von Ant Colony Verfahren evaluiert.

In Ant Colony Verfahren werden zur Exploration des Suchraums sogenannte Ants eingesetzt, deren Verhalten das Futtersuche-Verhalten realer Ameisen vereinfacht nachbildet: Jede Ameise bewegt sich zunächst zufällig im Raum, bis sie eine Futterquelle entdeckt. Entsprechend der Güte der Futterquelle wird der gefundene Weg zwischen Nest und Futter durch Duftstoffe (Pheromone) markiert. Folgende Ameisen werden in ihrer zufälligen Wegewahl durch die Pheromone beeinflusst, wobei die Wahrscheinlichkeit einen Weg zu wählen mit der Stärke der auf ihm deponierten Duftstoffe steigt. Da jede erfolgreiche Ameise auf ihrem Rückweg zum Nest weitere Pheromone ausbringt, die Duftstoffe aber mit der Zeit auch wieder verdunsten, konzentrieren sich die Duftstoffe mit der Zeit auf den kürzesten Wegen.

Bei der Übertragung dieser Idee in ein heuristisches Optimierungsverfahren wird das Problem als Graphenproblem modelliert, wobei jede Entscheidung einer Ameise bei der Wegewahl einem Knoten entspricht und die möglichen Alternativen durch Kanten des Graphen repräsentiert werden. Ist durch eine Folge von Entscheidungen eine vollständige Lösung konstruiert, dient die Lösungsgüte zur Berechnung der Pheromonmenge, die auf die Kanten des Lösungsweges ausgebracht wird. In jeder Iteration sucht eine Menge von Ants unabhängig voneinander nach einer Lösung. Am Ende einer Iteration, nachdem jede Ant eine Lösung gefunden hat, verdunsten die Pheromone mit konstanter Rate und die aus den verschiedenen Lösung

resultierende Pheromonupdates werden ausgebracht. Jeweils anwendungsspezifisch zu lösende Probleme stellen dabei die angemessene Codierung des Problems durch einen gewichteten Graphen sowie die Festlegung der Optimierungsparameter, z.B. Verdunstungsrate, Gewichtung der Pheromonspur bei der Wegewahl, Umrechnung von Lösungsgüte in Pheromone, Anzahl der Ameisen pro Iteration, Anzahl der Iterationen, dar.

Zur Untersuchung der Klimaanlagesteuerung wurde eine Klimaanlage betrachtet, die auf unterschiedlichen Stufen mit unterschiedlicher Leistung laufen kann. Ziel war es bei gegebenem zeitvariablen Stromtarif die Gesamtkosten über einem vorgegebenen Zeithorizont (24h) zu minimieren, wobei die Steuerung jeder Klimaanlage gewährleisten musste, dass die jeweilige Raumtemperatur im zulässigen Bereich, d.h.  $20 - 22,5^{\circ}\text{C}$  (bei einer Außentemperatur von  $31,1^{\circ}\text{C}$ ), bleibt.

Bei der Umsetzung auf ein Graphenproblem (siehe Abb. 2) wurden für jede Zeiteinheit (z.B. Viertelstunde oder Stunde) die  $n$  verschiedenen Leistungsstufen als Knoten modelliert. Die Kanten repräsentieren die Entscheidungen für eine bestimmte Leistungsstufe im nächsten Zeitschritt. Eine Ant, die zum Zeitpunkt  $t_0$  startet entscheidet bei der Wegewahl zufällig, ignoriert aber Entscheidungen, die zu einer Verletzung der Temperaturgarantie führen würden. Jeder so konstruierte Weg vom ersten bis zum letzten Zeitpunkt repräsentiert eine zulässige Betriebsführung der Klimaanlage. Basierend auf der je nach Leistungsstufe unterschiedlichen Energieaufnahme und dem zeitvariablen Tarif können die Betriebskosten für jede Zeiteinheit berechnet werden und als (reziproker) Gütwert bei der Pheromonausbringung auf den Lösungspfad verwendet werden.

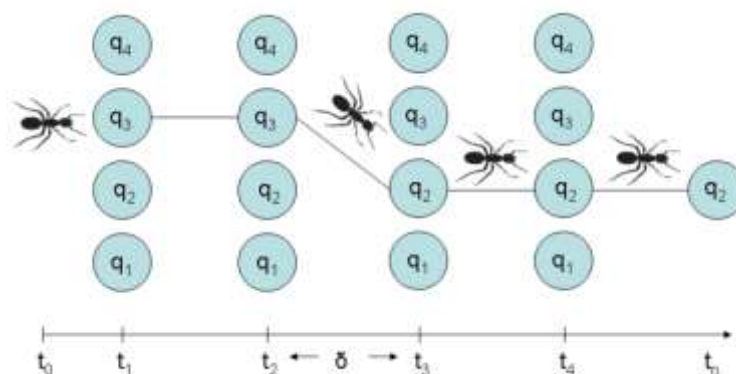


Abbildung 2: Modellierung einer Klimaanlage mit vier Leistungsstufen (Quelle: Müller, 2006)

ACO-Verfahren haben sich in der Anwendung als sehr gut geeignet erwiesen, wenn die Problemstruktur angemessen auf ein Graphenproblem übertragbar ist. Bei der hier vorgestellten Aufgabe beeinflusst jedoch die Entscheidung der Ant in den ersten Schritten die nachfolgenden Optionen, so dass es sinnvoll wäre, die Ameise nicht streng zeitlich sequentiell durch den Lösungsraum wandern zu lassen. Da eine Überprüfung der Temperaturbedingung bei einer abweichenden Traversierung des Lösungsraumes erst nach Konstruktion einer Lösung möglich ist, würden in diesem Fall jedoch auch unzulässige Lösungen konstruiert, was zu einem insgesamt höheren Rechenbedarf führen würde.

Im Vergleich des Ant Colony-Verfahrens mit Genetischen Algorithmen zeigte sich, dass die Verfahren nahezu gleichwertige Lösungen produzieren, die sehr dicht bei der optimalen Lösung liegen. Abb.3 zeigt hierzu Untersuchungen der erreichten Lösungsgüte bei einer Klimaanlage mit zwei (1), vier (2) bzw. sieben (3) Leistungsstufen über einem kurzen Zeitintervall von 12 Zeiteinheiten, über dem durch ein Brute Force-Verfahren (Enumeration aller zulässigen Lösungen) auch das tatsächliche Optimum bestimmt werden konnte.

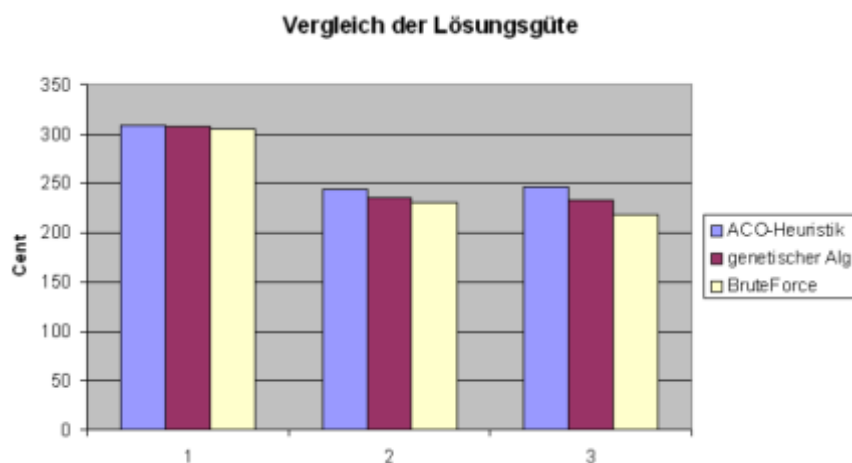


Abbildung 3: Vergleich der Lösungsgüte in drei Szenarien: Ant Colony Optimization (ACO), genetische Algorithmus und optimale Lösung (Brute Force) für das Problem der Klimaanlagesteuerung (Quelle: Müller, 2006)

### 3.2 Organic Computing

Eine Integration einer großen Anzahl dezentraler Stromerzeugungsanlagen sowie adaptiver Stromverbraucher in das bisherige zentrale Energiemanagement kann nur funktionieren, wenn ausreichend viele Informationen über den aktuellen Zustand und die Steuerungsmöglichkeiten der einzelnen Akteure für eine zentrale Planung

verfügbar sind. Dies würde bedeuten, dass eine sehr große Zahl über die verschiedenen Einsatzalternativen der Geräte an eine zentrale Stelle übertragen muss. Die hierzu erforderlichen Datenmengen stellen eine erhebliche, aber lösbare Herausforderung dar – die exponentielle Komplexität von Optimierungsverfahren schränkt die anwendbaren Verfahren auf Lösungsheuristiken ein. Die zur Planung benötigten unterschiedlichen Einsatzalternativen der Geräte lassen aber auch Rückschlüsse auf die Aktivitäten der Menschen zu. Daher ist eine solche zentrale Datenübertragung und -sammlung nicht nur eine technische Herausforderung, sondern in Bezug auf Datenschutz und –sicherheit als hoch sensibel zu betrachten.

Als eine Alternative zu einer zentralen Planung bietet es sich daher an, unter den verschiedenen Akteuren (Erzeuger, Verbraucher) lokal begrenzte Verbände als selbstorganisierende Micro Grids zu bilden, die sich weitgehend selbst versorgen und durch Verhandlungen der darin enthaltenen Akteure über Elektrizitätsproduktion und –verbrauch für einen selbstorganisierten Energieausgleich innerhalb des Verbundes bewirken. Das Optimierungsziel der Micro Grids kann in der möglichst weitgehenden Energieautarkie oder in der Gewinnmaximierung bzw. Kostenminimierung für den Ex- bzw. Import von Ausgleichsenergie bestehen.

Eine solche dezentrale Lösung vermindert den Kommunikationsaufwand, der bei der Planung sowie bei Abweichungen von der Planung nur noch zwischen Mitgliedern desselben Verbundes stattfindet. Das Übertragungsnetz wird durch das Ziel des lokalen Energieausgleichs entlastet und der notwendige Regelenergiebedarf reduziert. Eine selbstorganisierte und selbstheilende Organisation ist zudem besser skalierbar und robuster gegenüber Teilausfällen des Netzes.

Zur Modellierung dieser Aufgabe betrachtet man die diversen Akteure als Agenten in einem Multi-Agenten-System (MAS). Jeder Agent repräsentiert einen Erzeuger oder Verbraucher. Er kennt dessen Prognose für die eigene künftige Stromproduktion bzw. den –verbrauch sowie dessen Adaptionspotenzial und die resultierenden Kosten (Produktionskosten, Geräteverschleiß,...). (Lokales) Ziel jedes einzelnen Agenten ist die Deckung des eigenen Bedarfs zu optimalen Konditionen.

In autonomen Verhandlungen kommunizieren Agenten ihren Bedarf an einzukaufender bzw. zu verkaufender Energie an die Mitglieder ihres Verbundes. Agenten, die durch Adaption ihren eigenen Bedarf variieren können, bieten ihre „Hilfe“ an, wobei die Verhandlungsstrategie der Agenten altruistisch oder egoistisch

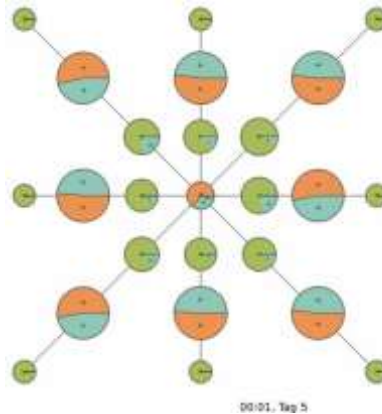
sein kann. Die Entscheidung für ein bestimmtes Angebot wird anhand der Zufriedenheit der beteiligten Agenten getroffen, wobei als Maß für die Zufriedenheit die Kosten angesehen werden können. Interessante Untersuchungsfragen bestehen darin, wie die „persönliche“ Zufriedenheit der einzelnen Agenten als lokales Optimierungsziel so gestaltet werden kann, dass sie zugleich auch zu einer hohen Zufriedenheit des zugehörigen Agentenverbandes beiträgt, die dem emergenten, globalen Optimierungsziel entspricht.

### 3.2.1 Selbstorganisierte Verbraucher-Cluster

Während in dem oben beschriebenen Ansatz Selbstorganisation zum dezentralen Matching zwischen Erzeugung und Verbrauch eingesetzt wird, kann die Methodik der Selbstorganisation aber auch in einem zentralen Steuerungsansatz verwendet werden, um der Komplexität der Steuerung einer Vielzahl kleiner, in ihrem individuellen Verhalten nur schwer prognostizierbarer Akteure zu begegnen.

In einem Teilprojekt des FEN (Forschungsverbunds Energie Niedersachsen) wurde die Frage der selbstorganisierten Konstruktion von Verbänden einer großen Anzahl kleiner Verbraucher betrachtet (Lünsdorf und Sonnenschein, 2010). Diese Verbände werden dann als Akteure im Lastmanagement durch eine zentrale Steuerung angesprochen, ohne dass die Geräte direkt adressiert werden müssten. Das Optimierungsziel für jeden Verband besteht darin, seinen Gerätepool so aufzubauen, dass dieser auf Steuersignale zu beliebigen Zeitpunkten mit möglichst flexiblen Lastverschiebungen der im Verband befindlichen Geräte in vorhersagbarem Rahmen reagieren kann. Mit diesem Ziel tauschen die Verbände selbstorganisiert Geräte untereinander aus, um die jeweiligen Pools zu optimieren.

In einer ersten simulativen Untersuchung des Selbstorganisationsverfahrens der Verbände wurde ein virtuelles, sternförmiges Stromnetz mit 25 Subnetzen modelliert, in denen sich jeweils 30 Kühlgeräten, Tiefkühltruhen und Spülmaschinen befinden (siehe Abb. 4). Jede Trafostation, die ein solches Subnetz anbindet, verwaltet einen Verbandsagenten und ist bestrebt durch Austausch von Geräten mit benachbarten Trafostationen (bzw. deren Agenten) ihren Handlungsspielraum und damit ihre Steuerbarkeit zu erhöhen und die Prognosefähigkeit der Reaktion auf ein Lastverschiebungssignal zu verbessern.



**Abbildung 4: Sternförmiges Netz aus 25 Trafostationen:  
Größe des Kreises symbolisiert die Zahl der zugeordneten Geräte**

Wegen der hohen Anzahl der Geräte und der zufälligen Interaktionen der Gerätenutzer wurde das Verhalten der einzelnen Geräte stochastisch modelliert.

Die Simulation des Agentenverhaltens zeigte bei der Clusterbildung eine relativ schnelle Konvergenz hin zu relativ homogenen Clustern, wobei zum einen kleinere Verbänden (<80 Geräte) mit (mindestens 75%) Kühlschränken und Tiefkühltruhen und zum anderen größere Verbände (>170 Geräte) mit Tiefkühltruhen und Geschirrspülmaschinen entstanden.

Weitergehende Untersuchungen dieses Verfahrens erfolgen in der Dissertation von Ontje Lünsdorf.

#### 4 Zusammenfassung

Prozesse in natürlichen Systemen können wertvolle Anregungen für die Gestaltung neuartiger Algorithmen zur heuristischen Lösung komplexer Optimierungsaufgaben liefern. Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung solcher naturinspirierter Verfahren ist, dass die Struktur von Problem und Lösungsverfahren gut genug übereinstimmen. Eine weitere Herausforderung besteht in der Festlegung der Parameter der Algorithmen, die typischerweise nur auf empirisch festgestellten Werten beruhen, den Lösungsverlauf aber stark beeinflussen können.

Das Paradigma *Organic Computing* liefert einen wertvollen Denkansatz zur verteilten Selbstorganisation komplexer Strukturen, zu dem bislang aber lediglich problemspezifische Ansätze bestehen. Beide Herangehensweisen, d.h. die naturinspirierte heuristische Optimierung und Organic Computing, können zur Lösung von Kontrollproblemen in Smart Grids eingesetzt werden.

## 5 Literatur

- Bremer, J., Andreßen, St., Rapp, B., Sonnenschein, M., Stadler, M., 2008: A modelling tool for interaction and correlation in demand-side market behaviour. In: D. Möst, W. Fichtner, M. Ragwitz, D. Veit (Eds.): Proceedings of the 1st European Workshop on Energy Market Modelling using Agent Based Computational Economics. Universitätsverlag Karlsruhe, ISBN 978-3-86644-238-2, S. 77-92
- Dorigo, M., 1992: *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, PhD Thesis, Politecnico di Milano, Italien.
- Goldberg, D. E., 1989: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley.
- Huth, A., Wissel, C., 1992: The Simulation of the Movement of Fish Schools. In: *Journal of Theoretical Biology* 156, S. 365-385
- Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D.; Vecchi, M. P., 1983: "Optimization by Simulated Annealing". *Science* **220** (4598): 671–680.
- Lünsdorf, O., Sonnenschein, M., 2010: Abschätzung des Lastverschiebungspotenzials eines dezentralen Steuerungssystems für Haushaltsgeräte. VDE-Kongress 2010 - E-Mobility, Leipzig
- Michalewicz, Z.; Fogel, D.B., 2000: How to solve It: *Modern Heuristics*, Springer, Berlin
- Müller, F., 2006: *Entwicklung eines Experimentiersystems zum Vergleich verschiedener Optimierungsheuristiken bei der Lastplanung adaptiver Verbraucher* Diplomarbeit, Universität Oldenburg
- Müller-Schloer, Ch.; Schmeck, H.; Ungerer, Theo (Eds.), 2011: *Organic Computing – A Paradigm Shift for Complex Systems*, Springer, Basel
- Sonnenschein, M.; Stadler, M.; Rapp, B.; Bremer, J.; Brunhorn, St., 2006: A Modelling and Simulation Environment for Real-Time Pricing Scenarios in Energy Markets. In: Tochtermann, K., Scharl, A. (Eds.): Informatics for Environmental Protection - Enviroinfo Graz 2006, ISBN 3-8322-5321-1, pp. 153-160
- Stadler, M., Krause, W., Sonnenschein, M., Vogel, U., 2007: The Adaptive Fridge – Comparing different control schemes for enhancing load shifting of electricity

demand. In: Hryniewicz, O., Studzinski, J., Romaniuk, M. (Eds.): 21<sup>st</sup> Conference on Informatics for Environmental Protection - Enviroinfo Warsaw 2007, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8322-6397-3, pp. 199-206

Vogel, U.; Pei, J.; Sonnenschein, M., 2006: Optimised Control of Adaptive Current Consumers - A First Approach. In: I. Troch, F. Breitenecker (Eds.): Proc. 5th MathMod Vienna. Vol. 2, Argesim Report No. 30, Argesim-Verlag Vienna, ISBN 3-901608-30-3

Vogel, U., Sonnenschein, M., 2007: Optimization of adaptive consumers to a time-varying electricity supply. In: J. Marx Gomez, M. Sonnenschein, M. Müller, H. Welsch, C. Rautenstrauch (Eds): Information Technologies in Environmental Engineering - ITEE 2007, Third International ICSC Symposium, Oldenburg. Springer Verlag