

Ein Algorithmus für den Wiederaufbau eines Smart Grid nach einem Blackout

Hendrik Buhl¹, Tim Dombrowski¹, Erik Julian Hogen¹, Maximilian Kreuzt¹, Daniel Palm¹, Sanja Stark¹, Peer Vincent Stubbe¹, Stephanie Alexandra Warsch¹, Jörg Bremer², Sebastian Lehnhoff² und Michael Sonnenschein³

Abstract: Im Rahmen der durch die Bundesregierung ausgerufenen Energiewende verändert sich die Struktur der Stromerzeugung von einer zentralen zu einer dezentralen, verteilten Stromproduktion. Diese bringt eine deutlich komplexere Organisation des Stromnetzes mit sich. Gleichzeitig erhalten Informations- und Kommunikationstechnik Einzug in die Stromversorgung – das Smart Grid entwickelt sich. Zwischen dem hierfür benötigten Kommunikations- und dem Stromnetz besteht jedoch eine wechselseitige Abhängigkeit. Dadurch wird das Wiederherstellen der Stromversorgung nach einem Blackout eine große Herausforderung. Als möglicher Lösungsansatz wurde ein verteiltes Verfahren entwickelt, das den automatisierten Wiederaufbau eines solchen Szenarios unterstützt. Es basiert auf einem Multi-Agenten-System, in dem durch das zyklische Bilden von Inselnetzen und den Zusammenschluss dieser Inseln der Wiederaufbau des Stromnetzes durchgeführt wird. Die prototypische Implementierung wurde in einer Simulationsumgebung getestet und mit einem empirischen Ansatz in Bezug auf seine Effektivität und Effizienz validiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Verfahren einen geeigneten Ansatz zur Lösung der gegebenen Problemstellung bietet.

Keywords: Schwarzstart; Smart Grid; Multi-Agenten-System

1 Einleitung

Durch die Förderung des Einsatzes erneuerbarer Energien zur Stromproduktion, ist eine strukturelle Veränderung der Stromversorgung zu erwarten. Die Entwicklung der Stromerzeugung von einer zentralen Produktion durch wenige große Kraftwerke, hin zu einer verteilten Erzeugung durch viele kleinere Energieanlagen, macht die Steuerung des Stromnetzes deutlich komplexer. Dies soll in Zukunft vermehrt durch Informations- und Kommunikationstechnik unterstützt werden, sodass ein sogenanntes Smart Grid entsteht [AKM12].

Der hier vorgestellte Algorithmus soll einen Ansatz bieten, um den Wiederaufbau eines von verteilter Energieerzeugung geprägten Smart Grids nach einem Blackout zu ermög-

¹ Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Department für Informatik, Ammerländer Heerstraße 114, 26129 Oldenburg, <vorname>.<nachname>@uni-oldenburg.de

² Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Abteilung Energieinformatik, Escherweg 2, 26121 Oldenburg, <vorname>.<nachname>@uni-oldenburg.de

³ Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Abteilung Umweltinformatik, Ammerländer Heerstraße 114, 26129 Oldenburg, <vorname>.<nachname>@uni-oldenburg.de

lichen. Hierzu wurden zunächst deutliche Vereinfachungen sowohl in Hinblick auf die elektrotechnische Modellierung der Netze als auch auf die Modellierung der Energieanlagen vorgenommen. Der Algorithmus basiert auf einem Multi-Agenten-System und bildet ausgehend von zuvor definierten Knoten im Stromnetz Inselnetze, innerhalb derer die Stromversorgung aktiviert wird. Dies wird durch die Wirkleistungsplanung der in dem Inselnetz enthaltenen Erzeuger und Verbraucher, in Anlehnung an die Produktionsplanung eines virtuellen Kraftwerkes, ermöglicht. Durch sukzessives Erweitern und Zusammenschließen der Inselnetze wird schließlich der vollständige Wiederaufbau des gesamten Stromnetzes erreicht.

Im Folgenden wird zunächst in Kapitel 2 ein Überblick über verwandte Arbeiten gegeben. In Kapitel 3 wird das entwickelte Verfahren vorgestellt und anschließend in Kapitel 4 die Ergebnisse der Validierung des Algorithmus präsentiert. Zum Schluss wird in Kapitel 5 ein Fazit gezogen.

2 Verwandte Arbeiten

Der Wiederaufbau eines Stromnetzes nach einem Blackout gehört, neben der Frequenz- und Spannungshaltung, sowie der Betriebsführung, zu den so genannten Systemdienstleistungen, die von den deutschen Netzbetreibern erbracht werden müssen [Be07]. Die Frage danach, wie diese Systemdienstleistungen in einem Smart Grid gewährleistet werden können, ist Gegenstand aktueller Forschungsprojekte. In [Ag14] wurden verschiedene Handlungsempfehlungen für den Versorgungswiederaufbau im Jahre 2030 erarbeitet. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass dezentrale Energieanlagen den Versorgungswiederaufbau unterstützen können.

Das Projekt Netz:Kraft beschäftigt sich mit der Frage, wie erneuerbare Energien in den Netzwiederaufbau einbezogen werden können [Fr17]. Dafür sollen einerseits die bereits vorhandenen Konzepte zum Wiederaufbau weiterentwickelt und auf die Besonderheiten erneuerbarer Energien angepasst werden. Andererseits werden Untersuchungen darüber angestellt, ob Ausfallzeiten durch den Einsatz dezentraler Anlagen in Versorgungsinseln verkürzt werden können.

Das Projekt Kickstarter verfolgt einen etwas konkreteren Ansatz [Ki15]. Hier wird die Möglichkeit eines Netzwiederaufbaus mit Hilfe eines stationären schwarzstartfähigen Großbatteriespeichers in Kombination mit einer nicht schwarzstartfähigen Gas-und-Dampf-Anlage untersucht. Schwarzstartfähige Erzeuger können nach einem Blackout ohne externe Stromzufuhr ihren Betrieb wiederaufnehmen, wodurch sie in der Lage sind, den Wiederaufbau der Stromversorgung zu initiieren.

Becker et al. beschäftigten sich mit der Frage, inwieweit Windenergieanlagen bereits heute in der Lage sind, einen Netzwiederaufbau zu unterstützen [Be16]. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass Windparks mit den heute verfügbaren Funktionen bereits unterstützend bei einem Netzwiederaufbau wirken könnten.

Der Betrieb von Inselnetzen durch verteilte Erzeuger wird unter dem Schlagwort Microgrid untersucht. Ein Microgrid wird in [MRS01] als Verbund kleinerer Erzeuger, Speichersystemen und Verbraucher, die gegenüber dem Gesamtnetz als legitimierte, unabhängige Einheit auftreten, definiert. In [MB17] wird erwartet, dass diese Microgrids eine der Schlüsselkomponenten bei der Entwicklung des Smart Grids darstellen.

Die Bildung leistungsausgeglichener Inseln kann als kombinatorisches Optimierungsproblem betrachtet werden. Zur Lösung von Optimierungsproblemen im Bereich des Energiemanagements wurden, neben zentralisierten mathematischen Verfahren [Pa04], in den letzten Jahren vermehrt naturinspirierte und verteilte Verfahren auf der Grundlage von Multiagentensystemen untersucht [So15]. Diese Verfahren eignen sich insbesondere aufgrund ihrer Robustheit gegenüber Teilausfällen und ihrer einfachen Adaptivität in Bezug auf die Integration neuer Agenten.

Als Beispiele für den Einsatz von Multiagentensystemen im Kontext von Energieversorgung seien hier die agentenbasierte Einsatzplanung virtueller Kraftwerke in [TA09] oder die Entwicklung eines verteilten Energiemanagementsystems in [LKR11] genannt. Diese Arbeiten zeigen, dass der Einsatz von Multi-Agenten-Systemen Potentiale zur Betriebsführung von Smart Grids eröffnet. Im Rahmen des Forschungsverbundes Smart Nord [HS15] wurden verschiedene Projekte zum Thema intelligente Netze durchgeführt. Zum Beispiel stellt [Ni14] einen agentenbasierten Algorithmus zu Steuerung dynamischer virtueller Kraftwerke vor.

Der hier vorgestellte Algorithmus verwendet das Verfahren COHDA [Hi14], das als Instanz eines Multiagentensystems in die Steuerung virtueller Kraftwerke integriert ist und für die prädiktive Einsatzplanung entwickelt wurde. Das Problem der Einsatzplanung besteht darin, mehrere dezentrale Erzeugungseinheiten so zu koordinieren, dass sie gemeinsam ein vorgegebenes Wirkleistungsprodukt erbringen. In [Hi14] werden die Erzeugungseinheiten durch Softwareagenten repräsentiert, die durch Nachrichtenaustausch ihr Weltwissen über die anderen in der Verhandlung befindlichen Agenten erweitern und darauf basierend ihre Leistungsauswahl treffen.

3 Algorithmus

Im Folgenden wird zunächst das der Arbeit zugrundeliegende Szenario vorgestellt. Anschließend wird der zyklische Ablauf des Verfahrens beschrieben. Für die Implementierung des Multiagentensystems in Java wurde ein einfaches Framework (MiniMAS) verwendet, das am OFFIS und an der Universität Oldenburg entwickelt wurde. Eine wichtige Grundlage des vorgestellten Algorithmus bildet außerdem eine COHDA-Implementierung in Java, die in die Software integriert wurde.

3.1 Szenariodefinition

Basis des Algorithmus bildet die stark vereinfachte Version eines Mittelspannungsnetzes, in welchem die für die Problemstellung wesentlichen Parameter in abstrahierter Form dargestellt sind. Ein Beispiel für ein solches Szenario ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Abstraktion des Szenarios wurde in Anlehnung an das europäische Verbundnetz erstellt. Grundlegende Informationen über dessen Aufbau und Funktionsweise finden sich zum Beispiel in [CV12]. Erzeuger und Verbraucher des Netzes werden durch Knoten repräsentiert, die durch Strom- und/oder Kommunikationskanten verbunden sind. Diese Knoten werden im Folgenden auch als Akteure bezeichnet und jeder Akteur wird von einem Softwareagenten repräsentiert.

Eine notwendige Annahme ist zunächst, dass im Kommunikationsnetz während des Blackouts ein Notbetrieb aufrechterhalten werden kann, sodass in den Bereichen, in denen die Inselbildung gestartet wird, bereits eine minimale Kommunikation vorhanden ist. Bei der Modellierung des Stromnetzes wird unterschieden zwischen einem vermaschten Mittelteil, der das Mittelspannungsnetz darstellt, sowie davon abgehender strahlenförmiger Netzabschnitte, die das Niederspannungsnetz repräsentieren. Auf jeder Stromkante befindet sich ein Leistungsschalter, der bei Aktivierung der zugehörigen Knoten geschlossen werden kann.

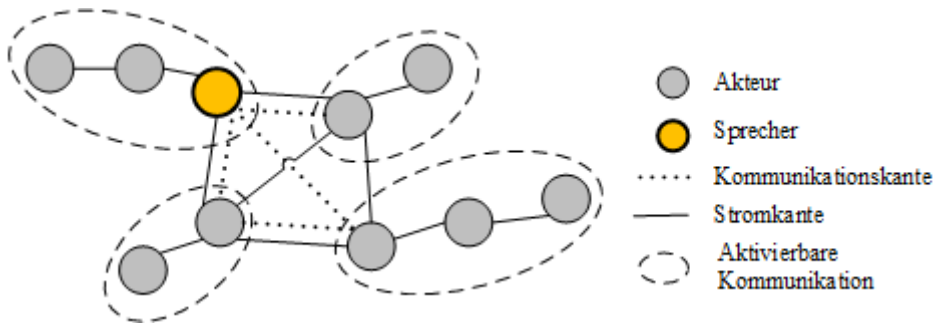


Abb. 1: Beispielhafte Darstellung des untersuchten Szenarios

Das Kommunikationsnetz besteht aus zwei Komponenten. In den oben erläuterten Mittelspannungsringen kann es von der Stromversorgung unabhängige Kommunikationskanten zwischen den Akteuren geben. Diese stellen den Notbetrieb des Kommunikationsnetzes dar. Für die Niederspannungsstränge ist eine aktivierbare Kommunikation vorgesehen. In einem Strang wird immer dann vollständige Kommunikation aktiviert, wenn der Akteur, der die Verbindung zum Mittelspannungsring darstellt, mit Strom versorgt ist.

Die durch die Netzknoten repräsentierten Erzeuger und Verbraucher können flexibel, dynamisch oder statisch ausgeprägt sein. Diese Ausprägungen unterscheiden sich darin, welche Flexibilität ein Akteur bei der Leistungsauswahl in unterschiedlichen Zeitschritten hat. Ein Zeitschritt im Algorithmus ist dabei eine abstrakte Größe, die frei festgelegt

werden kann. Die Anzahl der Zeitschritte die betrachtet wird, ist beliebig wählbar. Ein flexibler Akteur hat in jedem Schritt verschiedene Leistungswerte zur Auswahl, aus denen er frei wählen kann. Ein dynamischer Erzeuger oder Verbraucher hat eine vorgegebene Zeitreihe von Leistungswerten, die pro Zeitschritt genau eine Leistung vorgibt. Ein statischer Akteur besitzt eine Leistungsmöglichkeit, die er zeitunabhängig erzeugt oder verbraucht. Zum Testen des Algorithmus wurden zur Vereinfachung ganzzahlige Leistungswerte verwendet, die nicht explizit auf realistischen Werten von Erzeugern und Verbrauchern basieren, wobei das Verfahren nicht auf Integer-Werte beschränkt ist. Anfahrtrampen sowie unterschiedliche Änderungsgeschwindigkeiten von Anlagen wurden dabei nicht betrachtet. Akteure können mit einer beliebigen ganzzahligen Priorität versehen werden, um eine Bevorzugung bei der Zuschaltung in eine Insel zu unterstützen. Als Insel wird ein elektrischer Zusammenschluss von mindestens zwei Akteuren bezeichnet. Diese muss bilanzneutral sein, also die Summe der Leistungen der in ihr enthaltenen Akteure muss zu jedem Zeitpunkt 0 ergeben.

Es wird angenommen, dass einzelne Akteure schwarzstartfähige Erzeuger sind. Sie nehmen in dem Verfahren eine besondere, treibende Rolle ein und werden daher im Folgenden als Sprecher bezeichnet. Die Verteilung der unterschiedlichen Akteure, die Anzahl der Sprecher, sowie die Leistungswerte, wurden unabhängig von den realistischen Gegebenheiten des Stromnetzes im Zuge der Validierung variiert. Dadurch konnte die grundlegende Funktionalität des Algorithmus in einem möglichst breiten Spektrum an Szenarien getestet werden. Beispiele für realitätsnähere Szenarien finden sich in [HS15]: Auf Basis vorhandener Daten über die unterschiedlichen Spannungsebenen, Durchschnittsleistungen von Anlagen, Standardlastprofilen, Netzausbauplänen und Zukunftsprojektionen wurden Evaluationsszenarien für Nord- und Süddeutschland jeweils für die Jahre 2011 und 2030 entworfen.

3.2 Zyklus

Der Algorithmus zum Wiederaufbau des Stromnetzes verläuft in einem zyklischen Ablauf, der in Abbildung 2 dargestellt ist. Die einzelnen Prozessschritte werden dabei von den Sprechern angestoßen, die vorab im zu lösenden Szenario festgelegt werden. Die übrigen Agenten des Systems sind passiv und reagieren nur auf die durch die Sprecher initiierten Aktionen. Die Agenten kommunizieren über Nachrichten miteinander.

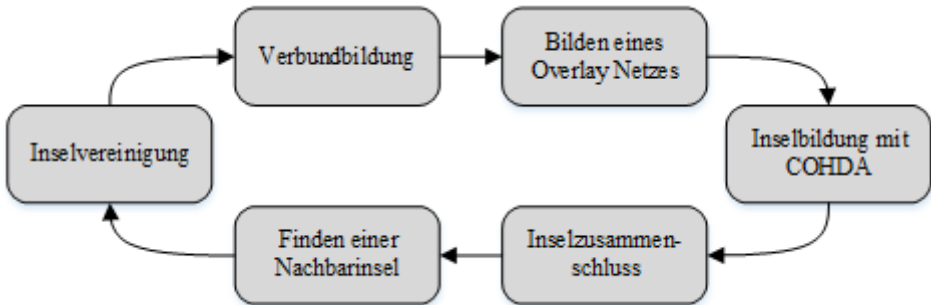


Abb. 2: Zyklischer Ablauf des Algorithmus

Der erste Prozessschritt ist die Verbundbildung. Hierfür sendet ein Sprecher Anfragen an alle benachbarten Agenten seiner Insel, zu denen sowohl eine Strom- als auch eine Kommunikationsverbindung besteht. Die angefragten Agenten antworten positiv, sofern sie sich nicht bereits in einer Insel oder in der Verbundbildung mit einer anderen Insel befinden. Anschließend erstellt der Sprecher für den entstandenen Verbund ein Overlay-Netz mit dem er festlegt, welche Verbundteilnehmer miteinander kommunizieren dürfen. Dies ist notwendig, da nur der Sprecher die Informationen besitzt, welche Agenten in dem Verbund enthalten sind.

Innerhalb dieses Verbundes wird nun die Optimierung durchgeführt. Diese basiert auf der Heuristik COHDA [Hi14], die das Lösen verteilter kombinatorischer Optimierungsprobleme ermöglicht. Das primäre Ziel ist es, eine ausgeglichene Insel zu bilden. Sekundär werden die Optimierungsziele der Inselgröße, der Sichtbarkeit und der Priorität betrachtet. Diese werden in einer gewichteten Zielfunktion zusammengefasst. Die Inselgröße bezieht sich dabei auf die Anzahl der Akteure in einer Insel und verfolgt das Ziel, möglichst große Inseln zu bilden. Die Sichtbarkeit beschreibt die Anzahl der Agenten in der Nachbarschaft einer Insel. Das dritte Optimierungsziel ist die bevorzugte Aufnahme priorisierter Agenten. Hierbei wird die Summe der Prioritäten der Agenten in einer Insel betrachtet.

Für Agenten, die sich noch nicht in einer Insel befinden, besteht die Möglichkeit sich selbst aus der geplanten Insel auszuschließen, sofern eine Lösung ohne sie der Leistungsausgeglichenheit näherkommt, als mit ihnen. Hierfür wurde das Verfahren COHDA um das Konzept einer Blacklist erweitert. Agenten, die nach der Konvergenz der Optimierung auf der Blacklist stehen, werden kein Teil der entstehenden Insel. Kommt es im Laufe der Optimierung zu einem direkten Vergleich zwischen zwei Lösungen mit gleicher Bilanz, wird die gewichtete Zielfunktion mit den sekundären Kriterien zur Bestimmung der Güte der Lösungen verwendet und die Lösung mit geringerer Güte anschließend verworfen.

Nach der Konvergenz des Optimierungsverfahrens prüft der Sprecher die gefundene Lösung. Handelt es sich um eine Lösung, bei der die Bilanz der Insel ausgeglichen ist, und wurde die vorherige Insel um mindestens einen Agenten erweitert, wird ein Inselzu-

sammenschluss durchgeführt, an dem alle nicht auf der Blacklist stehenden Agenten teilnehmen. Der Prozess des Inselzusammenschlusses beinhaltet das Schließen aller Schalter, die sich auf den Stromkanten zwischen den Agenten des Verbundes befinden, sowie die Aktivierung der in der Verhandlung ausgewählten Leistung für jeden Agenten. Die nun vergrößerte Insel fährt anschließend mit der Suche nach Nachbarinseln fort.

Wenn die Lösung ungültig war ($\text{Bilanz} \neq 0$) oder die Lösung der bereits bestehenden Insel entspricht, wird der Prozess des Inselzusammenschlusses übersprungen und direkt mit der Suche nach Nachbarinseln fortgefahren. Für die Suche nach Nachbarinseln sendet der Sprecher sequenziell Anfragen an alle Nachbarn seiner Insel, zu denen mindestens eine Strom- und eine Kommunikationskante aus seiner Insel existiert. Erst nach Erhalt der Antwort des soeben gefragten Agenten, wird der nächste Inselnachbar angefragt. Wenn er keine positive Rückmeldung erhält, wechselt er anschließend nach Abfrage aller potentiellen Nachbarn in einen Wartezustand, um seinerseits auf Inselanfragen zu warten. Eine Inselanfrage wird nur dann positiv beantwortet, wenn sich der Sprecher der angefragten Insel in eben diesem Wartezustand befindet. In diesem Fall gibt der Agent bei Erhalt einer Inselanfrage seine Sprecherrolle auf und wird zu einem normalen Agenten, während der Sprecher der anfragenden Insel seine Rolle behält und die Inselvereinigung durchführt. Anschließend wird die Suche nach Nachbarinseln in der Nachbarschaft der vereinigten Inseln wiederholt. Findet ein Sprecher keine Nachbarinseln und hat nach einer festgelegten Zeitspanne im Wartezustand auch keine Inselanfrage erhalten, beginnt der Zyklus wieder von vorne mit der Bildung eines neuen Verbundes.

Dieser Zyklus wird so lange wiederholt, bis es entweder keine Inselnachbarn mehr gibt, zu denen sowohl eine Strom- als auch eine Kommunikationskante besteht, oder bis das System stagniert, also Verhandlungen wiederholt mit dem gleichen Ergebnis enden, ohne dass es zu einer Vergrößerung der Inseln kommt.

4 Effektivität und Effizienz des Verfahrens

Kernpunkt der Bewertung der Effektivität bilden der erfolgreiche Wiederaufbau der Stromversorgung und die Erfüllung der beschriebenen Optimierungsziele. Der Wiederaufbau des Stromnetzes gilt als erfolgreich durchgeführt, wenn sich alle Agenten eines Szenarios, die ans Netz angeschlossen werden können, in einem Inselnetz befinden. Die Erfüllung dieser Anforderung wurde in der Testphase geprüft. Dafür wurden zunächst, ausgehend von den Parametern, durch die ein Szenario beschrieben werden kann, Äquivalenzklassen gebildet. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt. Diese Parameter wurden zu Testfällen kombiniert, die sowohl alle Äquivalenzklassen, als auch alle Kombinationen aus jeweils zwei Äquivalenzklassen abdecken. Auf Basis dieser Testfälle wurden anschließend die Testszenarien entwickelt, die so gestaltet wurden, dass es immer mindestens eine gültige Lösung für den Wiederaufbau gab. Beim Ausführen dieser Szenarien konnte gezeigt werden, dass in allen Fällen das Stromnetz erfolgreich wiederaufgebaut werden konnte, wodurch die Effektivität des Verfahrens bestätigt wurde.

Parameter	Äquivalenzklassen
Anzahl der Agenten	1 - 40; 41 - 100
Anzahl der Mittelspannungsringe	1; >1
Anteil der Sprecher	1; 50%
Anteil der flexiblen Anlagen	1-15%; 16-50%; 51-85%
Anteil der Agenten im MS-Netz	1-25%; 26-50%
Kommunikations-Shortcuts im Niederspannungsnetz	0; >0
Vermaschung des Mittelspannungsringes	0%; 10-60%
Verzweigung der Stränge im Niederspannungsnetz	vorhanden; nicht vorhanden
Anzahl an Kommunikationskanten im Mittelspannungsring	weniger als Stromkanten; gleich viele wie Stromkanten; mehr als Stromkanten

Tab. 1: Auflistung der Äquivalenzklassen der Eingabeparameter des Systems

Um die Effektivität der Zielfunktionen zu untersuchen, wurde ein spezielles Testszenario entworfen, das in Abbildung 3 zu sehen ist. Dieses Szenario repräsentiert in einem Minimalbeispiel den Fall, dass nicht alle Akteure innerhalb einer Verhandlung in eine Insel aufgenommen werden können, sodass mit Hilfe der gewichteten Zielfunktion eine Auswahl aus den möglichen Lösungen getroffen werden muss. Durch seinen Aufbau bietet das Szenario genau drei Lösungswege, die jeweils durch ein anderes Optimierungsziel angesprochen werden. Ein Lösungsweg beschreibt dabei die Reihenfolge der Zuschaltung der Agenten in die zu bildende Insel. Die verschiedenen Lösungswege unterscheiden sich dabei dadurch, dass im ersten Schritt jeweils andere Agenten in die Insel aufgenommen werden. Der erste Schritt des Wiederaufbaus jedes Lösungsweges ist in Abbildung 3 durch eine farbliche Hinterlegung gekennzeichnet. Der Algorithmus wurde mit unterschiedlichen Gewichtungen der Zielfunktion auf diesem Szenario ausgeführt. Zusätzlich zu den Gewichtungen wurde die Höhe der Priorisierung des als priorisiert markierten Knotens variiert.

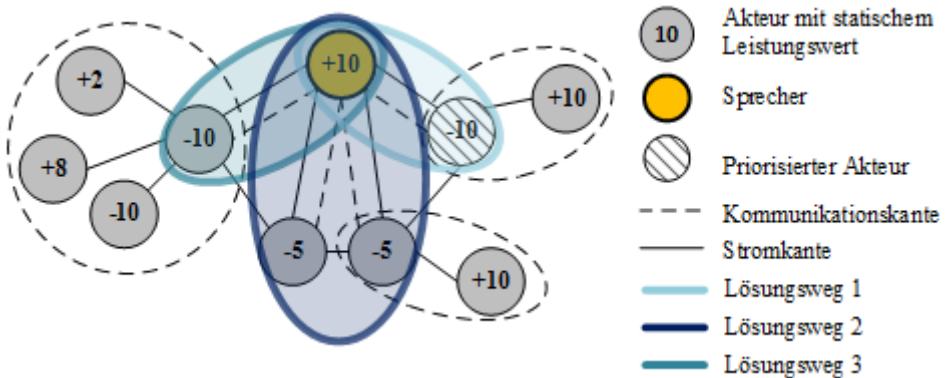


Abb. 3: Testszenario für die gewichtete Zielfunktion

Das primäre Ziel der ausgeglichenen Inselbilanz bildet die Grundlage des Verfahrens, da sich nur dann ein Inselzusammenschluss aus einer gefundenen Lösung bilden kann, wenn in jedem betrachteten Zeitschritt die Bilanz = 0 beträgt. Bereits durch die Tests für die Bewertung der Effizienz konnte gezeigt werden, dass durch das Optimierungsverfahren Lösungen mit einer ausgeglichenen Bilanz gefunden werden können, sofern diese existieren. Bei der Betrachtung der sekundären Optimierungsziele konnte gezeigt werden, dass die Gewichtung einen eindeutigen Einfluss auf den Aufbau des Netzes hat. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der verschiedenen Gewichtungen in Kombination mit der Höhe der Priorisierung des priorisierten Knotens dargestellt. Es ist zu sehen, dass durch die unterschiedliche Gewichtung der Zielfunktion jeweils ein anderer Lösungsweg gewählt wurden. Es zeigte sich auch, dass eine vergleichsweise hohe Priorisierung die anderen Ziele trotz bevorzugter Gewichtung außer Kraft setzen kann. Dadurch ist es möglich, beispielsweise die Inselgröße mit hoher Gewichtung zu bewerten, gleichzeitig aber durch hohe Prioritäten sicherzustellen, dass bestimmte Knoten dennoch bevorzugt in eine Insel aufgenommen werden.

Sichtbarkeit	Inselgröße	Priorität	Höhe der Priorität	Lösungsweg
0	0	1	2 5 10	1 1 1
0,2	0,2	0,6	2 5 10	1 1 1
0	1	0	2 5 10	2 2 2
0,2	0,6	0,2	2 5 10	2 1 1
1	0	0	2 5 10	3 3 3
0,6	0,2	0,2	2 5 10	3 2 1

Tab. 2: Ergebnisse Tests Effektivität nach Gewichtung

Zur Bewertung der Effizienz wurde der Algorithmus mit verschiedenen Szenarien durchgeführt, in denen jeweils unterschiedliche Eingabeparameter in unterschiedlichen Skalierungsstufen repräsentiert waren. Alle Szenarien entsprachen den in Abschnitt 3.1 beschriebenen Vorgaben. Die Eingabeparameter, sowie ihre jeweiligen Skalierungsstufen, sind in Tabelle 3 zu sehen. Um den Einfluss der anderen Szenarioparameter jeweils möglichst gering zu halten, wurde als Grundlage ein Standardnetz verwendet, in dem nur der jeweils zu betrachtende Parameter in seinen Skalierungsstufen angepasst wurde. Dieses Standardnetz besteht aus einem Mittelspannungsring mit angeschlossenen Niederspannungssträngen und beinhaltet in seiner Grundausrüstung 40 Agenten.

Eingabeparameter	Skalierungsstufen
Anzahl Agenten in den Niederspannungssträngen	0, 1, 5, 10, 20
Anzahl der zusammengeschlossenen Standardnetze	1, 2, 4, 9, 16
Anzahl der Sprecher	1 – 16
Anteil der flexiblen Agenten	1%, 15%, 50%, 85%
Anzahl der Shortcuts im Mittelspannungsring	0, 1, 4, 8, 50, 105

Tab. 3: Eingabeparameter für die Bewertung der Effizienz

Als Bewertungsgrundlage für die Validierung wurden, neben diversen anderen Kenngrößen, die Anzahl der Verhandlungen sowie die Anzahl der Nachrichten erfasst, die zum Wiederaufbau des Szenarios benötigt wurden. Dabei wurde deutlich, dass die Anzahl der Nachrichten maßgeblich durch den Prozess der Inselbildung mit COHDA bestimmt wird, während die Kommunikation außerhalb dieser Verhandlungen vernachlässigt werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Anzahl der Nachrichten mit der Anzahl der Agenten stark ansteigt. Dabei wurden deutliche Unterschiede festgestellt, je nachdem, auf welche Art die Anzahl der Agenten erhöht wurde. Zum einen wurde in dem verwendeten Standardnetz die Anzahl der Agenten in den Niederspannungssträngen erhöht. Zum anderen wurde die Anzahl der Agenten durch die Anzahl aneinander geschlossener Standardnetze skaliert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Nachrichtenanzahl wird dabei insbesondere von der Anzahl der Kommunikationskanten bestimmt. Dies wurde besonders durch die Skalierung der Anzahl der Agenten in den Niederspannungssträngen deutlich, da es sich in diesen Strängen um ein vollständig vermaschtes Kommunikationsnetz handelt. Um das Nachrichtenaufkommen zu verringern, würde es sich anbieten, bei der Erstellung des Overlaynetzes durch den Sprecher die Kommunikationsmöglichkeiten an dieser Stelle einzuschränken.

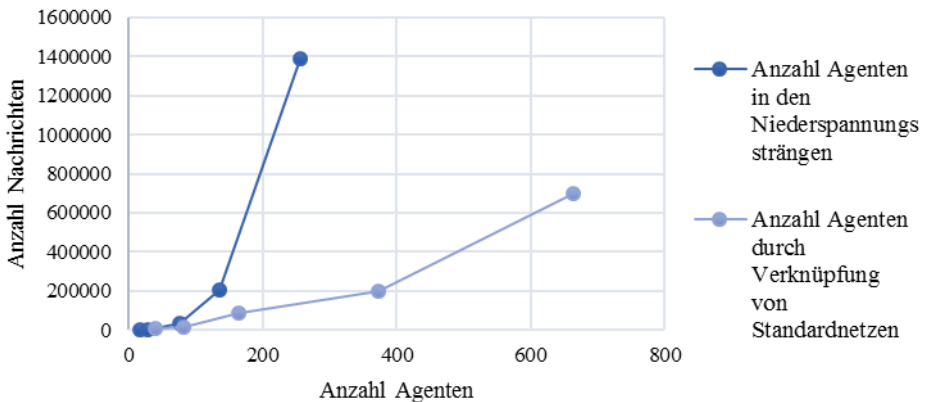


Abb. 4: Anzahl der Agenten und Anzahl der Nachrichten

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die grundlegende Funktionalität für ein Multi-Agenten-System zu entwickeln, durch die die Stromversorgung in einem Smart Grid nach einem Blackout wiederaufgebaut werden kann. Für den Entwurf des Systems wurde zunächst ein vereinfachtes Szenario erstellt, das grundlegende Eigenschaften des Stromnetzes, wie verschiedene Erzeuger und Verbraucher, verschiedene Kommunikationstechniken sowie

verschiedene Topologien, in abstrahierter Form abbildet. Anschließend wurde, auf Basis dieses Szenarios ein Algorithmus entworfen, der, ausgehend von zuvor definierten Sprecheragenten für schwarzstartfähige Anlagen, mit dem Aufbau des Stromnetzes beginnt. Hierfür wird wiederholt ein Zyklus aus Verbundbildung, Verhandlung, Inselzusammenschluss, Suche nach Nachbarinseln und Inselvereinigung durchlaufen. Für die Verhandlung wurde die Lösungsheuristik COHDA verwendet.

Die Validierung des Algorithmus zeigte, dass der Algorithmus funktional eine gute Grundlage bietet, jedoch insbesondere in Bezug auf den Nachrichtenaufwand noch verbessert werden kann. Hierfür konnten durch die Validierung bereits gute Ansatzpunkte ermittelt werden.

Weitere Fortschritte und Erkenntnisgewinne sind außerdem durch eine Erweiterung der Simulation zu erwarten. Als mögliche Potenziale sind hierbei die Einbindung in ein Simulationsframework, eine realitätsnähere Abbildung der Energieanlagen und des Kommunikationsnetzes, sowie die Integration einer Netzsimulation zu nennen. Dadurch könnte das Verhalten des Algorithmus bei realistischeren und komplexeren Szenarien untersucht werden.

Die Möglichkeit bereits geschlossene Leistungsschalter wieder zu öffnen, also Agenten den Austritt aus einer Insel zu ermöglichen, würde einen größeren Spielraum zur Findung von Lösungen ermöglichen. Darüber hinaus bietet eine Überprüfung und Erweiterung der Zielfunktion sowie eine Optimierung der Gewichte für spezifische Netzsituationen weitere Potenziale.

Die Grenzen des Algorithmus werden insbesondere bei der Kommunikation deutlich. Das Verfahren basiert auf der Grundannahme, dass alle versendeten Nachrichten zu einem zuvor bekannten Zeitpunkt ankommen. Daher gibt es keine Mechanismen zum Umgang mit verzögerten oder verlorenen Nachrichten.

Literaturverzeichnis

- [Ag14] Agricola, A.-C., et al.: dena-Studie Systemdienstleistungen 2030: Voraussetzungen für eine sichere und zuverlässige Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Berlin, 2014. https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads/_Dateien/esd/9094_dena-Studie_Systemdienstleistungen_2030.pdf, Stand 06.06.2017.
- [AKM12] Appelrath, H.-J.; Kagermann, H.; Mayer, C. (Hrsg.): Future Energy Grid: Migrationspfade ins Internet der Energie. Springer, Berlin u.a., 2012.
- [Be07] Berndt, H. et al.: Transmission Code 2007 – Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Berlin, 2007. [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/\\$file/TransmissionCode2007.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/$file/TransmissionCode2007.pdf), Stand 06.06.2017.

- [Be16] Becker, H. et al.: Netzwiederaufbaukonzepte: Mögliches Zusammenspiel zwischen Windenergieanlagen und thermischen Kraftwerken. In: VGB Powertech Journal. Jgg. 10, S. 57–62, 2016.
- [CV12] Crastan, V.: Elektrische Energieversorgung 1. Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik. 3. Aufl., Heidelberg u.a.: Springer, 2012.
- [Fr17] Fraunhofer IWES, Netz:Kraft: Netzwiederaufbau mit zukünftigen Kraftwerkstrukturen, <http://forschung-stromnetze.info/projekte/netzwiederaufbau-mitzukuenftigen/kraftwerkstrukturen/>, Stand 02.05.2017.
- [Hi14] Hinrichs, C.: Selbstorganisierte Einsatzplanung dezentraler Akteure im Smart Grid. Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2014.
- [HS15] Hofmann, L.(Hrsg.); Sonnenschein, M. (Hrsg.): Smart Nord: Final Report. <http://smarnord.de/downloads/SmartNordFinalReport.pdf>, Hannover, 2015.
- [Ki15] Kickstarter: Blackout ohne Folgen: Das Netz mit dezentralen Anlagen starten. <http://forschung-stromnetze.info/projekte/blackout-ohne-folgen-dasnetz-mit-dezentralen-anlagen-starten/>, Stand 03.05.2017.
- [LKR11] Lehnhoff, S.; Krause, O.; Rehtanz, C.: Dezentrales autonomes Energiemanagement. In: Automatisierungstechnik: Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik. Jgg. 59, S. 167–179, 2011.
- [MB17] Mumtaz, F.; Bayram, I.: Planning, Operation, and Protection of Microgrids: An Overview. In: Energy Procedia. Jgg. 107, S. 94–100, 2017.
- [MRS01] Marnay, C.; Robio, F. J.; Siddiqui, A. S.: Shape of the microgrid. In: Power Engineering Society Winter Meeting. Jgg. 1, S. 150–153, 2001.
- [Ni14] Nieße, A.; Beer, S.; Bremer, J.; Hinrichs, C.; Lünsdorf, O.; Sonnenschein, M.: Conjoint dynamic aggregation and scheduling methods for dynamic virtual power plants. In: Federated Conference on Computer Science and Information Systems. IEEE, Piscataway, NJ, S. 1505–1514, 2014.
- [Pa04] Padhy, N. P.: Unit commitment - a bibliographical survey. IEEE Trans. on Power Systems, 19(2):1196–1205, 2004.
- [So15] Sonnenschein, M.; Vogel, U.; Hinrichs, C.: From ecological modeling to decentralized optimization of smart power grids. In: (Cunningham, D; et al., Hrsg.): Informatik 2015. GI-Edition - Lecture Notes in Informatics (LNI), Vol. 246, Bonner Köllen Verlag, S. 385-396, 2015.
- [TA09] Tröschel, M.; Appelpath, H-J.: Towards reactive scheduling for large-scale virtual power plants. In: Multiagent system technologies. Springer, Berlin, S. 141–152, 2009.