

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



ABSCHLUSSBERICHT

CoNDyNet

STROMNETZE
Forschungsinitiative der Bundesregierung

Zuwendungsempfänger:

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK)
– Transdisziplinäre Konzepte und Methoden

Förderkennzeichen:

03SF0472A

Vorhabenbezeichnung:

Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze: Stabilität, Effizienz und Risiken
(CoNDyNet)

Laufzeit des Vorhabens:

01.09.2014 - 31.12.2017

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Autoren:

Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Jürgen Kurths
Dipl. Soz. Heike Prietzel
Dr. Sabine Auer
Dr. Frank Hellmann
Dr. Paul Schultz

DOI:

[10.2312/PIK.2018.005](https://doi.org/10.2312/PIK.2018.005)

Inhalt

I KURZDARSTELLUNG.....	4
I.1 Aufgabenstellung.....	4
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	5
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
II EINGEHENDE DARSTELLUNG.....	8
II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	8
II.1.1 Bearbeitung der Teilprojekte.....	8
II.1.1a Teilprojekt I.1 „Synchronisation und Stabilität“.....	8
II.1.1b Teilprojekt II.4 „Netzwerkdynamik bei dezentraler Steuerung“.....	11
II.1.1c Teilprojekt III.3 „Dezentrale Smart Grids und Aggregation“.....	14
II.1.2 Wissenschaftliche Ergebnisse.....	17
II.1.3 Beteiligte Mitarbeiter*innen.....	19
II.1.4 Kooperationen.....	20
II.1.4a Wissenschaftliche Kooperation mit den Verbundpartnern.....	20
II.1.4b Wissenschaftliche Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen.....	21
II.1.4c Kooperationen mit Industriepartnern.....	22
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	23
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	23
II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	24
II.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen.....	25
II.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	26
II.6.1 Wissenschaftliche Publikationen.....	26
II.6.2 Fachvorträge und Präsentationen.....	28
II.6.3 Weitere Veröffentlichungen.....	31

I KURZDARSTELLUNG

I.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Forschungsvorhabens im Rahmen des Forschungsverbundes „Kollektive nichtlineare Dynamik komplexer Stromnetze“ (CoNDyNet) finanziert durch die Förderinitiative „Zukunftsfähige Stromnetze“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung war für das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung die Erforschung von Aspekten der Stabilität und Synchronizität von Stromnetzen, der Netzdynamik bei dezentraler Steuerung und der dezentralen Aggregation von Stromerzeugung im Kontext von Smart Grids. Schwerpunktmäßig untersucht wurden die Auswirkungen der Netztopologie auf Stabilität und Resilienz, sowie Möglichkeiten der Vereinfachung von Regelungs- und Bepreisungskonzepten in Smart Grids und deren Wechselwirkung mit der Netzstabilität.

Die Fragestellungen wurden in den drei parallel bearbeiteten Teilprojekten „Synchronisation und Stabilität“, „Netzwerkdynamik bei dezentraler Steuerung“ und „Dezentrale Smart Grids und Aggregation“ in jeweils vier neunmonatigen Arbeitspaketen teilweise in enger Abstimmung mit Verbund- und Industriepartnern bearbeitet.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Zu Beginn des Projekts existierten wenige Arbeiten die sich aus Sichtweise der Theorie der komplexen Systeme bzw. der theoretischen Physik mit Fragen der Stabilität des Stromnetzes beschäftigten. Andererseits wurden in den vorangegangenen Jahren am PIK neue Methoden entwickelt die eine holistische Betrachtung solcher komplexen Systeme mit vielen Akteuren ermöglichen (siehe auch I.4). Gleichzeitig wurde zunehmend klar das eine holistische Betrachtung des Stromnetzes in Zukunft unausweichlich werden würde. Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung legte einen Fokus auf die systemische Betrachtung der Energiewende, sowie auf eine bessere Vernetzung von Forschungsakteuren untereinander und mit der Industrie um einen schnelleren Transfer von Forschungsergebnissen sicherzustellen.

Das Vorhaben wurde im Verbund CoNDyNet durchgeführt. Dieser Verbund diente dabei als ein idealer Brückenkopf zur theoretischen Forschung, und ist mit seinem theoretisch fundierten, methodischen, aber eben praxisorientierten Ansatz einzigartig.

Im Verbund CoNDyNet wurden erfolgreich theoretische Physiker und Ökonomen mit Anwendern zusammengebracht, um wesentliche Fragestellungen der Energiewende mit einem interdisziplinären Methodenspektrum zu beleuchten. Dadurch ist in Deutschland ein neues, bislang weltweit einzigartige Forschungsfeld mit einer ebenfalls einzigartigen Forschungsgemeinschaft zur Nichtlinearer Dynamik von Stromnetzen und Energiesystemen entstanden. Die Forschungsgruppe am PIK hat in diesem Rahmen mit diesem Projekt dazu beigetragen, ein neues interdisziplinäres Forschungsfeld zu etablieren auf dem wir derzeit international führend sind.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben war für den Gesamtverbund für eine Laufzeit von drei Jahren beginnend im September 2014 geplant. Aufgrund der Tatsache, dass wir mehr Modelle als geplant selbst entwickeln mussten und sich die Arbeiten bei den Projektpartnern ebenfalls als arbeitsaufwendiger herausgestellt haben, wurde die Projektlaufzeit für den Verbund kostenneutral bis zum Ende des Kalenderjahres 2017 verlängert. Für die Forschungsarbeit wurden wie geplant ein Postdoktorand, sowie zwei Doktorand*innen eingestellt, die durch einen Senior Researcher, den Verbundkoordinator und die Wissenschaftliche Assistenz, sowie durch Studentische Hilfskräfte unterstützt wurden.

Während der gesamten Projektlaufzeit gab es eine enge Zusammenarbeit sowohl mit den Partnern innerhalb des Verbundprojektes, als mit anderen Forschungseinrichtungen und Industriepartnern.

Drei Teilprojekte konnten überaus erfolgreich bearbeitet und mit einer Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen abgeschlossen werden. Der detaillierte Ablauf wird in Abschnitt II.1.1 dargestellt.

Die Ergebnisse wurden außerdem sowohl innerhalb der wissenschaftlichen Forschungsgemeinschaft auf zahlreichen Konferenzen vorgestellt als auch mit Wirtschaftsvertretern diskutiert.

Weitere auf den Ergebnissen aufbauende Veröffentlichungen sind geplant.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Ein umfangreicher Literaturüberblick zum Stand der Wissenschaft bei Projektbeginn findet sich im Verbundantrag. Im Folgenden sollen im Sinne der Kurzdarstellung noch einmal wesentliche Punkte aus der Stromnetzforschung wiedergeben.

Die zunehmend dezentrale Organisation, intermittente Erzeugung, Lastfluktuationen sowie eine stärkere Anbindung der Energiemärkte zeigen in ihrer Kombination, dass für einen effektiven Ausbau und einen robusten Betrieb zukünftiger Stromnetze kollektiv dynamische Phänomene berücksichtigt werden müssen. Stand der Technik waren (und sind größtenteils) regelmäßige *statische* Lastflussberechnungen. Darauf aufbauend haben wir das *dynamische* Verhalten von Stromnetzen auf kurzen Zeitskalen (ca. 1s) betrachtet. Auf diesem Feld gab es bereits etablierte Modelle elektrischer Maschinen, die jedoch oft vereinfacht, nahe dem stationären Betrieb und linearisiert verwendet wurden. Insbesondere gehörte zum Stand der Technik, dass nur wenige Softwareumgebungen zur Simulation komplexer Stromnetze wie z.B. PSS-E¹ (Siemens AG) zur Verfügung standen. Da die Modellierung in derartigen kommerziellen Produkten oft auf sogenannte Black-Box-Modelle zurückgreift, ist es in der Regel unmöglich Simulationsergebnisse wissenschaftlich zu testen und zu validieren. Stand der Technik und immer noch üblich sind Simulationsstudien an Testsystemen. Eine Generalisierung der numerischen Ergebnisse ist nur eingeschränkt möglich. Dies führte letztlich zum Aufbau eigener Open-Source-Softwarelösungen in CoNDyNet.

Die mathematische Analyse von Versorgungs- und Kommunikationsnetzwerken hat u.A. eine erhöhte Anfälligkeit gekoppelter Netzwerke festgestellt sowie auf Leitungsausfälle folgende großflächige Fehlerkaskaden untersucht und damit Beiträge zum Verständnis der strukturellen Stabilität geleistet. Dies

¹ Siehe siemens.com/.../pss-e.html (14.06.2018)

geschah allerdings in der Regel mit einer vereinfachten Darstellung existierender Stromnetze. Auf der anderen Seite gab es auch Ansätze in der angewandten Ingenieursliteratur kollektive dynamische Phänomene wie Selbstorganisation oder Inter-Area-Oszillationen auf einer phänomenologischen Ebene zu untersuchen. An dieser Stelle sollte CoNDyNet eine Brücke schlagen, basierend insbesondere auf unseren Vorarbeiten zur Synchronisation komplexer Netzwerke und probabilistischen Stabilitätsmaßen.

Sowohl in den Ingenieurwissenschaften als auch in der theoretischen Physik existierten Vorarbeiten zur Quantifizierung einzelner Arten von Stabilität mit einer meist vereinfachten Repräsentation von Übertragungs- und Verteilnetzen. Dabei werden die Auswirkungen der Netzwerkstruktur, Interaktion verschiedener Netzebenen, Extremereignisse und die nichtlineare Natur der Dynamik im allgemeinen nicht berücksichtigt.

Dies bedeutet, dass im Gegensatz zu den entwickelten bzw. bekannten probabilistischen Stabilitätsmaßen aus eigenen Vorarbeiten², vornehmlich kleine Störungen des Betriebszustandes betrachtet werden.

Ein seit längerem diskutierter Ansatz ist ein ökonomisches Anreizsystem für ein flexibles dezentrales Lastmanagement in Smart-Grids. Dabei spielt auch das Verbraucherverhalten eine große Rolle (z.B. Ladezeiten von Elektroautos) was mit Methoden der agentenbasierter Modellierung und Spieltheorie abgebildet werden kann. Stand der Wissenschaft dazu ist die Anwendung auf Multiagenten-Entscheidungssituationen in konventionellen Strom- bzw. Energiemärkten. Die Marktakteure können dabei ggf. ein eingeschränkt rationales Verhalten zeigen. Als offener Punkt hat sich allerdings die Wechselwirkung mit der Dynamik und Struktur der Stromnetze herausgestellt. Grundsätzlich war die Datenbasis zu realen Stromnetzen bei Projektbeginn nicht ausreichend. Dies zeigte den Bedarf an Modellen zur synthetischen Erzeugung realistischer Stromnetztopologien auf.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es gab eine intensive inhaltliche Zusammenarbeit mit allen vier wissenschaftlichen Verbundpartnern: Frankfurt Institute für Advanced Studies (FIAS), Jacobs University Bremen (JUB), Forschungszentrum Jülich (FZJ) sowie dem Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation (MPIDS). Im Rahmen dieser Zusammenarbeit ist eine Vielzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen entstanden.

Daneben haben wir mit verschiedenen anderen wissenschaftlichen Partnern eng zusammengearbeitet, unter anderem der Technischen Universität Berlin und dem Fraunhofer IWES in Kassel.

Als besonders fruchtbar hat sich die intensive Zusammenarbeit mit verschiedenen industriellen Partnern erwiesen, insbesondere mit Siemens Corporate Technology, XRG Simulations GmbH in Hamburg und SciGRID in Oldenburg. Hieraus entstanden unter anderem gemeinsame Publikationen, die wir auf ingenieurwissenschaftlichen Konferenzen vorstellen und in dieser Community veröffentlichen konnten. Besonders erfolgreich war für uns der Austausch mit Forschern und Anwendern auf der von uns in Potsdam im Juni 2017 organisierten Konferenz „Dynamics in Power Systems – From Science to Industry“. Wir haben

² Menck, P. J., Heitzig, J., Marwan, N., & Kurths, J. *How basin stability complements the linear-stability paradigm*. Nature Physics, 9(2), 89–92 (2013)

dort unsere Ergebnisse einem breiten Fachpublikum aus Wissenschaftlern und Anwendern wie 50Hertz und Siemens, aber auch KMUs, und Vertretern aus Zivilgesellschaft präsentiert und mit ihnen diskutiert. Auf große Resonanz stießen dabei die vorgestellten Ergebnisse zur Vorhersage der Reaktion des Gesamtsystems auf Leitungsausfälle und probabilistischen Methoden für Stabilität bei Extremereignissen, sowie die bereits fest in Forschung und Anwendung etablierte Open-Source-Software PyPSA zur techno-ökonomischen Energiesystemanalyse. In ausführlichen Diskussionsrunden (Break-Out Sessions) mit den Vertretern aus der Energiewirtschaft wurden zentrale Themen und Fragen identifiziert, bei denen von Seiten der Industrie weiter hoher Bedarf an Grundlagenforschung gesehen wird und bei denen ein interdisziplinärer Ansatz, wie er in CoNDyNet verfolgt wird, sehr vielversprechend ist. Besonders diskutiert wurde das Erkennen kritischer Netzzustände bei unvollständiger Information, die genaue Analyse des Potentials der Sektorkopplung und die Integration erneuerbarer Energien in wechselrichterdominierten Netzen mit wenig Schwungmasse. Der Brückenschlag zur Industrie und weiteren anwesenden Institutionen aus der Anwendung war insgesamt sehr erfolgreich, und es besteht beidseitig großes Interesse an weiterer, idealerweise dauerhafter Zusammenarbeit. Es hat sich gezeigt, dass zentrale Pfeiler der Grundlagenforschung Themen höchster Relevanz betreffen und der interdisziplinäre Blick, der von CoNDyNet etabliert wurde, sehr produktiv ist.

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die Zuwendungen wurden vor allem für die Beschäftigung qualifizierter Wissenschaftler*innen verwandt. Diese haben sich intensiv mit den Forschungsfragen auseinandergesetzt, u.a. den Auswirkungen der Netztopologie auf Stabilität und Resilienz, Möglichkeiten der Vereinfachung von Bepreisungskonzepten in Smart Grids und deren Wechselwirkung mit der Netzstabilität. Ihre wichtigen und in vielen Bereichen neuen und wissenschaftlich führenden Ergebnisse konnten in einer Vielzahl hochrangiger wissenschaftlicher Veröffentlichungen und Vorträge sowohl innerhalb der Forschungsgemeinschaft als auch in ingenieurwissenschaftlichen Zusammenhängen veröffentlicht und in Zusammenarbeit mit Anwendern unterschiedlichen Nutzergruppen zugänglich gemacht werden. Nachfolgend werden die Arbeiten an den Teilprojekten überblicksartig dargestellt. Im Anschluss daran wird ausführlich auf die erzielten Ergebnisse eingegangen.

II.1.1 Bearbeitung der Teilprojekte

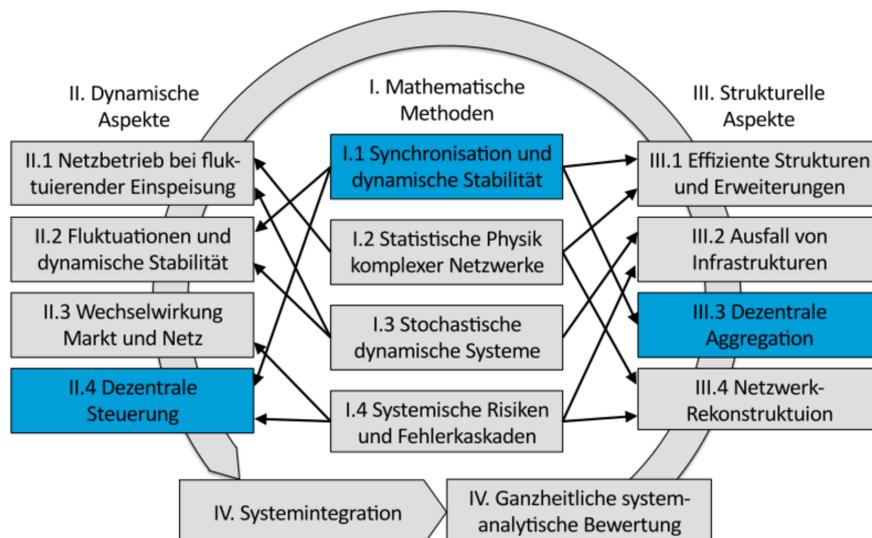


Abb. 1: PIK-Teilprojekte im Rahmen des Verbundantrages

Die wissenschaftlichen Arbeiten des Forschungsverbundes gliederten sich entsprechend dem Verbundantrag in vier Bereiche mit verschiedenen Teilprojekten (siehe Abb. 1). Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) hat federführend die Teilprojekte TP I.1, TP II.4 und TP III.3 bearbeitet. Die Ergebnisse dieser Teilprojekte werden im Folgenden detailliert ausgeführt.

II.1.1a Teilprojekt I.1 „Synchronisation und Stabilität“

Für den Betrieb von Stromnetzen mit Wechselspannung ist es essentiell, dass alle Akteure, Erzeuger und Verbraucher, im Einklang schwingen. Dieses Regime nennt sich Synchronisation und ist eine emergente Eigenschaft der zu Grunde liegenden Dynamik, welche in verschiedensten technischen und biologischen

Systemen auftritt. Die Aufrechterhaltung des synchronen Betriebes wird, vornehmlich auf kurzen Zeitskalen, gestört durch fluktuierende erneuerbare Einspeisung sowie Lastschwankungen. Längerfristige Störungen entstehen beispielsweise durch (großflächige) Extremwetterereignisse oder andere größere Einwirkungen wie Leitungsausfälle. Der Fokus dieses TP liegt auf kurzen Zeitskalen. Generell wird die Frage nach der Stabilität eines jeweiligen synchronen Betriebszustandes aufgeworfen. Stabilität bezeichnet hier im Speziellen die Fähigkeit nach einer Störung den synchronen Betrieb wiederzuerlangen. Weiterhin sollten dabei die Betriebsgrenzen bei der Netzfrequenz und bei Spannungsabweichungen nicht überschritten werden. Konventionelle Methoden zur Stabilitätsanalyse in Physik und Ingenieurwissenschaften basieren auf einer Linearisierung der Systemdynamik und berücksichtigen daher nur kleine Störungen. Eine ganzheitliche Stabilitätsbetrachtung benötigt zusätzlich komplexere (realistischere) Modelle von Übertragungs- und Verteilernetzen bzw. deren Interaktion, sowie die Miteinbeziehung großer Störungen insbesondere auf kurzen Zeitskalen. Das Ziel von TP I.1 ist es somit die etablierten mathematischen Verfahren um neue Methoden zu erweitern und eine Modellstudie zur ganzheitliche Stabilitätsanalyse zu erstellen.

Teilprojekt I.1 – Arbeitspaket I: „Entwicklung mathematischer Analyseverfahren“

Im ersten Arbeitspaket wurden zunächst Methoden zur Stabilitätsanalyse neu- und weiterentwickelt. In begleitenden Dialogen mit Energieversorgern, Ingenieurbüros und Herstellern von Kontrollsoftware haben wir die Nachteile herkömmlicher und den Bedarf neuer Methoden identifiziert sowie regelmäßig unsere Ansätze zur Diskussion gestellt. Dabei stellte sich heraus, dass die sogenannten probabilistischen Stabilitätsmaße für komplexe Netzwerke -- zu denen bereits Vorarbeit am PIK bestand -- im Vergleich zu anderen Ansätzen am vielversprechendsten sind. Ein Beispiel ist die Bassinstabilität, welche die Wahrscheinlichkeit bemisst in Reaktion auf zufällige -- insbesondere auch große -- Störungen zum synchronen Zustand zurückzukehren. Erwartungsgemäß stellte sich aber auch heraus, dass für den praktischen Einsatz weitere Entwicklungen notwendig sind. Diese Überlegungen führten zur "Survivability" (Überlebensfähigkeit), welche die Robustheit des Netzes gegenüber Störungen unter Einbeziehung der Betriebsgrenzen abschätzt und konzeptionell eine wesentliche Verallgemeinerung der Bassinstabilität darstellt [Hellmann2016]. Weiterhin lässt sich Survivability selbst auch (semi-)analytisch abschätzen und wird somit für Echtzeitanwendungen interessant. Dies ist besonders hervorzuheben, da probabilistische Stabilitätsmaße im Allgemeinen zeitaufwendige Simulationen benötigen.

Von der alternativ vorgesehenen Anwendung rekurrenzbasierter Methoden haben wir abgesehen, da ein unmittelbarer Anwendungsvorteil nicht identifiziert werden konnte.

Teilprojekt I.1 – Arbeitspaket 2: „Test durch Anwendung auf Modellsysteme“

Nachdem wir in AP1 die probabilistischen Stabilitätsmaße als vielversprechende Methode auf dem Weg zu einer ganzheitlichen Analyse identifiziert haben, wurden einfache verbreitete Referenzmodelle von Stromnetzen (IEEE Power System Test Cases, Skandinavisches Höchstspannungsnetz, OpenStreetmap-

Datensatz Deutschland³) für einen vergleichenden Test identifiziert. Neben der Erstellung eines Berichts wurden zeitaufwändig die verschiedenen Datenformate prozessiert und validiert um die nötigen Parameter zu extrahieren. Ursprünglich war keine Veröffentlichung auf Basis des Testberichts vorgesehen, die Erkenntnisse flossen allerdings in TP II.4 AP3 (siehe Diskussion dort) ein. Gleichzeitig haben wir ein Zufallsstromnetzwerkmodell entwickelt [Schultz2016a], welches im Gegensatz zu Vorarbeiten sowohl verschiedene Netzebenen abbilden als auch real beobachtbare Einspeise- und Lastprofile in den Konstruktionsprozess mit einbeziehen und somit realistischere Topologien erzeugen kann. Das Zufallsstromnetzwerkmodell, unseres Wissens nach das erste seiner Art, floss ebenso wie die Ergebnisse des Testberichts in einige unserer nachfolgenden Veröffentlichungen ein, besonders [Nitzborn2017].

Teilprojekt I.1 – Arbeitspaket 3: „Entwicklung eines ganzheitlichen Stabilitätsbewertungskonzepts“

Die bisherigen methodischen Ergebnisse wurden nun in einem weiteren Testbericht für eine ganzheitliche Betrachtung der dynamischen Stabilität von Stromnetzen zusammengefasst. Als Beispiel sei hier die gleichzeitige Anwendung von Bassinstabilität und Survivability in einer sogenannten “Stabilitätslandkarte” genannt. Die Kombination dieser zwei Maße allein erlaubt bereits eine Ausdifferenzierung topologisch verschiedener Knotentypen und Entdeckung neuartiger dynamischer Zustände. Weiterhin haben wir begonnen in Zusammenarbeit mit dem CoNDyNet-Partner FIAS unsere intern entwickelten Softwarelösungen in allgemein verfügbare Prototypen⁴⁵ zu überführen, nachdem die ursprünglich angedachte Kooperation mit Siemens nicht zu Stande kam. Unsere Software zur dynamischen Simulation von Stromnetzen -- und dynamischen Systemen im Allgemeinen -- ist kompatibel mit der am FIAS entwickelten Software PyPSA⁶ und geht z.B. mit der Generierung von synthetischen Solar- und Windeinspeisereihen über den ursprünglich geplanten Umfang hinaus. Die Kombination aus etablierten sowie in CoNDyNet entwickelten Methoden mit den genannten Softwarepaketen bildet die Grundlage zu einer gesamtheitlichen Stabilitätsbewertung welche transparent und in der Modellierung nachvollziehbar ist.

Teilprojekt I.1 – Arbeitspaket 4: „Netzdesignempfehlungen für reale Stromnetze“

In AP1 bis AP3 standen die Stabilität des synchronen Betriebszustandes und deren gesamtheitliche Bewertung im Mittelpunkt. Aus der Kombination mit einem Ensemble zufällig generierter Stromnetze (siehe AP2 und [Schultz2016a]) konnten wir den Einfluss verschiedener Netztopologien auf die Stabilität untersuchen und damit im Sinne eines “Smart Wiring” konzeptionelle Netzdesignempfehlungen ableiten. In Verteilnetzen beispielsweise, lassen sich an Hand netzwerktheoretischer Maße Regionen identifizieren, in denen die Intermitenz erneuerbarer Energiequellen besonders hohe Frequenzfluktuationen in das

3 Projekt „SciGRID“, Förderinitiative „Zukunftsfähige Stromnetze“ der Bundesregierung.

4 CoNDyNet-Software „PyBAOBAP“ <https://gitlab.pik-potsdam.de/hellmann/pyBAOBAP>

5 CoNDyNet-Software „PyPSD“ <https://gitlab.pik-potsdam.de/condynet/PyPSD>

6 CoNDyNet-Software „PyPSA“ <https://pypsa.org/>

Gesamtnetz injiziert [Auer2017a]. Aus der Wahrscheinlichkeit die Betriebsgrenzen zu überschreiten (Survivability) lässt sich dann auch ein Regelleistungsbedarf grob abschätzen.

Teilprojekt I.1 – Erzielte Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass TP I.1 erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Während der Projektlaufzeit ergab sich eine Abweichung vom ursprünglichen Vorhaben dadurch, dass die geplante Kooperation mit Siemens zur Softwareentwicklung leider nicht zu Stande kam. Dies konnten wir allerdings durch eine professionelle Weiterentwicklung unserer internen Softwarelösungen zu Open-Source-Projekten PyBAOBAP und PyPSD, auch zusammen mit dem FIAS, kompensieren. Die weiteren Ergebnisse bestehen aus zwei Testberichten deren Ergebnisse für nachfolgende Veröffentlichungen verwendet werden konnten. Alle geplanten Veröffentlichungen wurden erreicht: [Hellmann2016] (AP1), [Schultz2016a] (AP2) und [Auer2017a] (AP4). Darüber hinaus wurden auch in den anderen TP noch weitere von der Bassinstabilität ausgehende Methoden zur Stabilitätsanalyse entwickelt. Daraus gingen die Veröffentlichungen [Schultz2017], [Schultz2018] und [Lindner2018] hervor.

II.1.1b Teilprojekt II.4 „Netzwerkdynamik bei dezentraler Steuerung“

Gegenstand des Teilprojekts II.4 war die Analyse der Dynamik dezentraler, frequenzbasierter Steuerung des Stromsystems. Hierbei wurden verschiedene Vorschläge, entweder durch marktwirtschaftliche Anreize, oder durch Systemanschlussbedingungen, ein netzdienliches Verhalten zu erreichen, untersucht. Durch diese soll eine selbstorganisierte Betriebsführung mit hoher Frequenzstabilität erreicht werden. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der Frage von systemischen Risiken solch einer Betriebsführung, und der Frage nach Gegenmaßnahmen die solche Risiken mindern oder sogar eliminieren können.

Teilprojekt II.4 – Arbeitspaket I: „Spezifizierung von Modellvarianten und Datenbeschaffung“

In AP1 wurde besonders die Modellierung dezentraler Einspeisung, sowie das Studium verschiedener Modellvarianten vorangetrieben. Dabei wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner in Göttingen besonders Verzögerungen in der Reaktion auf dezentrale Marktanzreize als ein möglicher Problempunkt identifiziert, und Arbeiten zur destabilisierenden Wechselwirkung von Netzdynamik und Marktreaktion begonnen. Speziell wurde sowohl die Größe der Verzögerung als auch mögliche Fenster der Preisbildung als systemkritische Parameter ausgemacht.

Der Fokus lag hierbei zunächst auf einfache Netzwerkmotiven. Die genaue Analyse der zur Verfügung stehenden Netzstrukturen und Modelle hat darüber hinaus die IEEE-Testnetze als beste Kandidaten für realistische Systeme identifiziert.

Des weiteren begannen Studien zum notwendigen Modellierungsgrad von Netzwerkdynamiken, speziell mit einem Blick auf die Spannungsregulierung in konventionellen Kraftwerken. Die in der Vorhabenbeschreibung vorgesehene Modellierung von Einspeisezeitreihen in Zusammenarbeit mit FIAS stellte sich als schwierig da, da die kritischen Zeitskalen deutlich unter der Zeitskala liegen die am FIAS betrachtet wurde.

Teilprojekt II.4 – Arbeitspaket 2: „Analyse als dynamisches System und Optimierungsproblem“

In Teilprojekt II.4 wurden die Arbeiten am Einfluss verzögerter Marktreaktionen in einfachen Netzwerkstrukturen abgeschlossen und in [Schäfer2016] veröffentlicht.

Die Arbeiten zu Spannungsdynamik und notwendigem Modellierungsgrad bei Stabilitätsanalysen die in AP1 begonnen wurden, wurden erfolgreich abgeschlossen. Unter anderem mit in TP I.1 AP1 entwickelten analytisch-numerischen Methoden aus der Theorie der dynamischen Systeme wurden die Stabilitätseigenschaften und die Bifurkationsstruktur der Modelle untersucht. Es wurden dabei neuartige Instabilitäten entdeckt. Die Ergebnisse wurden in [Auer2016b] veröffentlicht.

Auf der Modellierungsseite gab es in diesem AP zwei wichtige Fortschritte. Wir nutzten mathematische Analogie zwischen der Modellierung von Marktteilnehmern und gewissen anderen Netznutzern (Power Electronics und Wechselrichter) um weitere Netzteilnehmer realistisch zu modellieren.

Bezüglich der Modellierung der Einspeisung von erneuerbaren Energien wurde eine Kooperation mit ForWind Oldenburg initiiert, die die stochastischen Eigenschaften der erneuerbaren Erzeugung modelliert haben. In der verbleibenden Laufzeit des AP2 werden wir unseren Modellen erstmals solche realistischen Einspeisedaten zugrunde legen.

Die Formulierung der Entscheidungsstrategien als Optimierungsproblem, um Handlungsmuster abzuleiten, hat sich im Kontext der mathematischen Modellierung in TP II.4 als nicht zielführend erwiesen. Diese Idee wird allerdings im Rahmen der konzeptionellen Agenten/Marktmodelle in TP III.3 weiterverfolgt.

Teilprojekt II.4 – Arbeitspaket 3: „Systemische Risiken und Gegenmaßnahmen“

Mit Hilfe neu entwickelter ganzheitlicher Stabilitätskriterien aus TP I.1 AP1 wurden systemische Risiken für ungewollte Interaktionen in dezentral gesteuerten Stromnetzen untersucht. Dabei stellten sich insbesondere die Inter-Area-Oszillationen als relevante Gefahren heraus, die bereits bei Vernachlässigung der Verzögerungen in der Steuerung auftreten können. Durch eine systematische, auf Zufallsnetzen basierende Untersuchung und die ganzheitliche Betrachtung transienter und asymptotischer Stabilität, konnten vorher nicht bekannte dynamische Zustände identifiziert werden. Diese Zustände entsprechen weder einem stabilen synchronen Zustand noch einer vollständigen Desynchronisation des Netzes, sondern sind qualitativ neu und bieten eine mögliche Erklärung für die in der Praxis beobachteten Inter-Area-Oszillationen. Diese Zustände waren in der theoretischen Literatur bislang auch deswegen unbekannt, weil sie nur bei einer Gesamtsystembetrachtung und nur bei Störungen an bestimmten Knoten auftreten. Bemerkenswerterweise konnten wir die Knoten, an denen es möglich ist, solche Oszillationen auszulösen, durch ihre Topologie exakt klassifizieren. Damit ist es möglich, gezielt Gegenmaßnahmen zu ergreifen oder durch ein Netzwerkdesign, das die anfälligen topologischen Muster vermeidet, solche Oszillationen wirksam zu verhindern. Die Ergebnisse wurden in [Nitzborn2017] publiziert.

Teilprojekt II.4 – Arbeitspaket 4: „Realistisches Modellieren: Wechselwirkungen mit der

Spannungsdynamik“

Durch die Herausforderungen in der Modellierung, der erfolgreichen Behandlung der Frage der Spannungsdynamik in AP2, und den Erkenntnissen zu neuartigen systemkritischen Netzzuständen in AP3 war die ursprüngliche Ausrichtung von AP4 auf die Interaktion von Spannungs- und Frequenzdynamik nicht mehr zielführend. Es wurde zudem klar das eine weiterführende erfolgreiche Studie fluktuierender heterogener Systeme mit einer Vielzahl unterschiedlicher zukünftiger dynamischer Akteure, eine neue Klasse numerische Solver erfordern wird.

Die Frage der optimierten Struktur und Steuerung von Verteilnetzen verschob sich damit in die Arbeiten im Rahmen von TP III.3 AP4.

In TP II.4 AP4 wurde mit der Recherche und probeweise Implementierung neuer Solver begonnen, und in diesem Rahmen eine Bachelor-Arbeit in der numerischen Mathematik betreut. Dieser Prototyp erlaubt zwar prinzipiell die Abbildung komplexerer fluktuierender Systeme, stellte sich allerdings in der Praxis als zu langsam heraus. Es bestehen Pläne im Anschluss an CoNDyNet eine auf state-of-the-art Solverbibliotheken aufbauende Version der Dynamik in PyPSD/PyPSA zu implementieren.

Darüber hinaus wurden die neue Netzzustände die in AP3 entdeckt wurden im Rahmen einer Masterarbeit [Plietzsch2017] detailliert untersucht, und vereinfachte mathematische Modelle gefunden die gleichartige Zustände aufzeigen, und mathematische Kriterien für das auftreten solcher Zustände entwickelt.

Teilprojekt II.4 – Erzielte Ergebnisse

Insgesamt wurden in TP II.4 sehr erfolgreich eine Vielzahl an Arbeiten und Erkenntnissen zur dynamischen Stabilität bei dezentraler frequenzbasierter Steuerung entwickelt. Dabei wurden die Methoden der dynamischen Stabilitätsanalyse aus der Theorie der komplexen Systeme erstmals auf Stromnetzmodelle angewandt. Zum einen wurden dadurch neuartige systemkritische Zustände entdeckt die in stark dezentralen und heterogenen Netzen auftreten können. Zum anderen wurde detailliert aufgezeigt welche Art von Netzwerkstrukturen solche Zustände begünstigen.

Des weiteren wurde gezeigt das Verzögerungen in der Interaktion von Steuerung und/oder Marktreaktionen einerseits und dem physikalischen Stromnetz andererseits destabilisierend wirken können, aber bei richtigem Design auch stabilisierend wirken. ENTSO-E wies in einer Veröffentlichung 2017 dezidiert auf diese Probleme mit verzögerten Reaktionen hin⁷. Die theoretischen Arbeiten die hier entstanden sind, sind damit ein wichtiger Input für das Design praktische Regelsysteme, sowie eine Grundlage für weitere angewandte Forschung in diesem Gebiet.

Die während dem Projekt erzielten Erkenntnisse führten zu einer Anpassung der Arbeiten gegen Ende der Projektlaufzeit. Dabei kam als neuer Fokus die Entwicklung neuer Software hinzu, die in der Lage ist komplexe Dynamik präzise und performant Abzubilden. Die begonnen Arbeiten zu diesem Thema werden als Open-Source-Anwendungen sowohl anderen Wissenschaftlern als auch Unternehmen zur Verfügung stehen.

⁷ ENTSO-E. *High Penetration of Power Electronic Interfaced Power Sources (HPoPEIPS) ENTSO-E Guidance document for national implementation for network codes on grid connection.* (2017).

Mit Abschluss des Projektes stehen bereits eine Prototypische Dynamik Bibliothek (PyPSD) sowie eine Software die realistische Einspeisereihen auf Zeitskalen von Sekunden erzeugen kann zur Verfügung.

II.1.1c Teilprojekt III.3 „Dezentrale Smart Grids und Aggregation“

In diesem Arbeitspakets soll für das in Teilprojekt II.4 untersuchte frequenzbasierte Lastmanagement ein allgemeinerer Rahmen mit Hilfe von Konzepten der agentenbasierten Modellierung und Spieltheorie geschaffen werden. Ziel ist es die Dynamik und Effizienz von verbraucherseitigen

Lastmanagementkonzepten (aus Teilprojekt II.4) und deren Wechselwirkungen mit dem physikalischen Übertragungsnetz mit Methoden der agentenbasierten Modellierung und Spieltheorie zu untersuchen.

AP1 soll dafür einen Überblick über Agenten, Handlungsmuster, und emergenten Phänomene in komplexen Handelsnetzwerken bei dezentraler Aggregation erarbeiten.

Aufgabe von AP2 war eine agentenbasierte Simulation eines dezentralen, frequenzbasierten Lastmanagements vorzunehmen.

AP3 soll mit Hilfe des “Mechanism Designs” eine Frequenz-Preis-Funktion entwickelt werden, bei deren Verwendung eine optimaler Trade-Off zwischen Frequenzstabilität, wirtschaftlicher Effizienz und Einfachheit erreicht wird. Dazu soll die Dynamik des Stromnetzes für verschiedene Modellszenarien unter der Berücksichtigung realistischer Fluktuationen von Erzeugung und Verbrauch simuliert werden.

Aufgabe von AP4 ist die Erforschung der dynamischen Stabilität und der ökonomischen Effizienz von frequenzgesteuerten dezentralen Smart Grids in Abhängigkeit von der Netzwerktopologie. Im Mittelpunkt soll dabei der Unterschied zwischen großen integrierten Verbundnetzen und kleinen gekoppelten Teilnetzen stehen, am Beispiel des europäischen und des japanischen Stromnetzes. Auf dieser Basis soll die Eignung der beiden Ansätze für ein vollständig erneuerbares Smart Grid bewertet und Empfehlungen für den Ausbau des europäischen Verbundnetzes abgeleitet werden.

Teilprojekt III.3 – Arbeitspaket I: „Dezentrale Aggregation in komplexen Handelsnetzwerken“

In diesem Arbeitspaket wurden die zentralen Akteure in Stromhandelsnetzwerken identifiziert und mögliche Kopplungen mit dem Stromnetz untersucht. Aufbauend auf diesen Recherchen war es uns möglich, gemeinsame Untersuchungen an einem agentenbasierten Modell zum italienischen Regelenergiemarkt, basierend auf [Mureddu2015] vorzunehmen. Im Laufe des Jahres fanden dazu einige bilaterale Treffen mit unserem Partner JUB statt.

Unsere Überlegung zu den unterschiedlichen Zeitskalen von Marktprozessen und Stromnetzynamik führten uns zu dem Ergebnis künftige Kopplung von Markt und Netz durch Lastflussrechnungen vorzunehmen, um Engpässen, die durch den Stromhandel entstehen, frühzeitig entgegenwirken zu können. Zur Abschätzung des Potentials der Blindleistungsbereitstellung aus dem Verteilnetz zur Netzstabilisierung wurde in enger Kooperation mit unserem Industriepartner Siemens ein Lastflussmodell für ein 100%-Erneuerbare-Energie-Szenario in Deutschland erstellt und die Ergebnisse in einem Konferenzpapier für die IEEE ISGT Europa-Konferenz 2016 aufbereitet [Auer2016a] .

Die Identifikation von Handlungsmustern von Marktakteuren führte außerdem zu der Entdeckung von „Delays“ in zukünftigen Smart Grids auf Grund von Mess- und Reaktionszeiten für netzstabilisierende Maßnahmen. Der Einfluss solcher Delays wurde in [Schäfer2016] untersucht und mündete in den Entwurf einer weiteren wissenschaftlichen Publikation.

Somit konnten bereits 2014 begonnene Arbeiten zur Untersuchung geeigneter Markt- und Netzmodelle abgeschlossen werden. Damit wurde Teilprojekt III.3 AP1 erfolgreich beendet und die Ergebnisse flossen in zwei Veröffentlichungen ein.

Teilprojekt III.3 – Arbeitspaket 2: „Agentenbasierte Modellierung und Simulation“

Der Fokus von TP III.3 AP2 liegt primär auf Handlungsmustern lokaler Akteure und deren individuellen Verbrauchsentscheidungen. Wir konnten Erkenntnisse zur Preisbildung am Regelleistungsmarkt mit erhöhter Einspeisung Erneuerbarer Energien für die Wahl geeigneter lokaler Heuristiken gewinnen und für ein dezentrales netzstabilisierendes Einspeisemanagement nutzbar machen. Das in II.4 erwähnte Papier [Schäfer2016] enthält hierzu bereits erste Ergebnisse und stellt insofern eine Grundlage für nachfolgende Arbeiten dar.

In diesem Rahmen betreuten wir ab Ende 2015 eine Masterarbeit. Diese Arbeit stellte, wie bereits erwähnt, eine Erweiterung der Idee des „Decentral Smart Grid Control“ dar. Im Gegensatz zu vorherigen Arbeiten war der Fokus dieser Arbeit nicht die Robustheit des Übertragungsnetzes gegenüber großen Einzelknotenstörungen in Frequenz und Phase, sondern die Kontrolle der Frequenzfluktuationen im Verteilnetz innerhalb fest vorgegebener Grenzen unter intermittenter Stromeinspeisung an allen Knoten. Die Modelle zur Generation von kontinuierlichen, realistischen Fluktuationen in der Stromeinspeisung Erneuerbarer Energien wurden von unseren Oldenburger Kooperationspartnern bereitgestellt. Heterogene Agenten mit stochastischen Nutzerprofilen können dann innerhalb ihrer zeitlichen Verfügbarkeit individuell entscheiden, ob sie auf ein Preissignal, abgeleitet von lokalen Frequenzstörungen, reagieren. Diese Entscheidung ist abhängig von der gewählten Strategie, weswegen wir im Praxistest verschiedene, meist simple Heuristiken in ihrer Performance bezüglich Netzstabilisierung vergleichen.

Das Arbeitspaket wurde inhaltlich mit der Publikation von Sabine Auer unter dem Titel “The Contribution of Different Electric Vehicle Control Strategies for Dynamical Grid Stability“ erfolgreich abgeschlossen [Auer2017b].

Teilprojekt III.3 – Arbeitspaket 3: „Tarif-Design“

Im Arbeitspaket „Tarif-Design“ haben wir in Zusammenarbeit mit der Jacobs University Bremen ergänzend zu den bereits in AP2 durchgeführten Vergleichen verschiedener Preis-Frequenz-Funktionen ein weiteres Marktmodell entwickelt, mit dessen Hilfe die Auswirkungen verschiedener Tarifdesigns und anderer Komponenten des Marktdesigns auf einerseits ökonomische Indikatoren und andererseits die Stabilität des Netzes studiert werden können. In diesem Modell stehen die (beschränkt) rationalen strategischen

Entscheidungen verschiedener Typen heterogener Entscheidungsträger (Konventionelle Großkraftwerke, Windparkbetreiber, private Solaranlagenbetreiber etc. einerseits und Netzbetreiber andererseits) angesichts unsicherer Produktion und Nachfrage und die Frage, wie diese durch geeignetes „Mechanism Design“ günstig beeinflusst werden können, im Vordergrund. Dazu wurden acht verschiedene Tarif- und Marktdesigns ausgewählt, die eine große Bandbreite möglicher Vergütungsmodelle abdecken: Uniform Pricing oder Pay as Bid, Pay Requested oder Pay Supplied, mit oder ohne vorgeschriebenem Curtailment. Die verschiedenen Präferenzen der Akteure und die daraus resultierenden Optimierungsprobleme der strategischen Agenten wurden in einem agentenbasierten Modell implementiert und mittels Monte-Carlo-Simulation analysiert. Um die gewählten Marktvarianten zu vergleichen, wurden die durchschnittlichen gesamtökonomischen Kosten der Stromproduktion inklusive Balancing und Curtailment, die Gewinne der Stromproduzenten, die Gesamtkosten für die Stromverbraucher, der durchschnittliche Strompreis, die Price Bid-to-Cost Ratio und als Stabilitätsindikatoren die Gesamtnetzauslastung und der Balancingbedarf ermittelt und mittels statistischer Tests auf signifikante Unterschiede geprüft. Als eindeutig bestes Kompromissdesign wurde die Kombination der Tarif-Komponenten Uniform Pricing, „Pay Requested“ und erzwungenem Curtailment ermittelt, die im Vergleich zum schlechtesten Design nur einen halb so hohen Strompreis, halb so hohe gesamtökonomische Kosten, nur 40% der Höhe bei den Verbraucherkosten und eine um 35% verringerte Netzbelastung ergab. Die Publikation der Ergebnisse konnte erfolgte in [Heitzig2017].

Teilprojekt III.3 – Arbeitspaket 4: „Ausbau des Verbundnetzes für einen stabilen dezentralen Betrieb“

Durch die in den letzten Jahren gewonnen Erkenntnisse schien uns die in III.3 AP4 „Ausbau des Verbundnetzes für einen stabilen dezentralen Betrieb“ vorgesehene Fallstudie, die hauptsächlich auf Frequenz-Preiskopplung beruht, nicht mehr zielführend. Der prinzipiellen Frage nach der optimalen Betriebsführung großer dezentral gesteuerter Netze, die auch aus Verbänden von Regionalen Microgrids bestehen können, gehen wir momentan in einer Kooperation mit dem Lehrstuhl für Regelungstechnik und Energie-Systeme der TU Berlin nach. In einer ersten in diesem Rahmen entstandenen und inzwischen bei der IEEE-Konferenz ICDCM angenommenen Arbeit konnten wir belegen, dass die ganzheitlichen Stabilitätsbewertungskonzepte für einzelne DC-Microgrids gut anwendbar sind und neuartige Erkenntnisse liefern [Streng2017].

Zusätzlich hat Maria Jarolin in ihrer Masterarbeit am PIK netzführende Wechselrichter in Mittelspannungsnetzen modelliert und deren Kontrollparameter auf Stabilität hin optimiert. Diese Ergebnisse wurden in [Jarolin2018] veröffentlicht, eine darauf aufbauende Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift ist in Aussicht.

Teilprojekt III.3 – Erzielte Ergebnisse

Insgesamt wurde Teilprojekt III.3 mit drei Papieren, zwei Masterarbeiten und einem Bericht erfolgreich

abgeschlossen.

In AP1 wurde, wie geplant, in einem Bericht ein Überblick über Agenten, Handlungsmuster, und emergenten Phänomene in komplexen Handelsnetzwerken bei dezentraler Aggregation verfasst.

Die Aufgabe von AP2, eine agentenbasierte Simulation eines dezentralen, frequenzbasierten Lastmanagements vorzunehmen, wurde mit der Publikation [Auer2017b] zu lokalen Heuristiken für ein dezentrales netzstabilisierendes Einspeisemanagement mit Hilfe von Elektroautos erfüllt.

Die in AP3 geforderte Frequenz-Preis-Funktion wurde, dem Zeithorizont von Marktdynamiken entsprechend, durch verschiedene Tarif- und Marktdesigns ersetzt. Diese wurden in [Heitzig2017] unter Berücksichtigung realistischer Fluktuationen von Erzeugung und Verbrauch simuliert und auf Kosteneffizienz, Einfachheit und Netzstabilität hin verglichen. In AP4 wurde an Stelle der Frequenz-Preis Kopplung die Frage nach der prinzipiellen optimalen Steuerung von DC und AC Teilnetzen gestellt [Strenge2017], [Jarolin2018].

II.1.2 Wissenschaftliche Ergebnisse

Die Zusammenfassung der in der Vorhabenbeschreibung vereinbarten Projektziele und der während der Projektlaufzeit erzielten Ergebnisse erfolgt tabellarisch:

Vereinbarte Ziele	Erzielte Ergebnisse
I.1 Synchronisation und Stabilität	
Wissenschaftliche <u>Veröffentlichung</u> zu neuartigen, bassin- und/oder rekurrenzbasierten mathematischen Analyseverfahren zur dynamischen Stabilität in Stromnetzen	<u>Veröffentlichung</u> : <i>Survivability of Deterministic Dynamical Systems</i> . [Hellmann2016]
<u>Testbericht</u> über die Anwendung der entwickelten Methoden auf Modellsysteme	<u>Testbericht</u> zur Anwendung entwickelter Methoden auf Modellsysteme erstellt
Wissenschaftliche <u>Veröffentlichung</u> zu neu entwickelter Methode zur Generierung fiktiver Netzwerktopologien	<u>Veröffentlichung</u> : <i>A Network of Networks Approach to Interconnected Power Grids</i> . [Schultz2016a]
<u>Bericht</u> über das entwickelte ganzheitliche Stabilitätsbewertungskonzept	<u>Bericht</u> zu Stabilitätsbewertungskonzept erstellt
Implementation eines <u>Softwareprototypen</u>	<u>Softwareprototypen</u> PyBAOBAP und PyPSD
Wissenschaftliche <u>Veröffentlichung</u> zu Netzdesignprinzipien zur Stabilitätssteigerung realer Stromnetze	<u>Veröffentlichung</u> : <i>Stability of Synchrony against Local Intermittent Fluctuations in Tree-like Power Grids</i> . [Auer2017a]
II.4 Netzdynamik bei dezentraler Steuerung	
<u>Bericht</u> über die zu verwendenden Modellvarianten und beschafften Daten	<u>Veröffentlichung</u> anstelle des Berichts: <i>Taming Instabilities in Power Grid Networks by Decentralized Control</i> . [Schäfer2016]
Wissenschaftliche <u>Veröffentlichung</u> zur analytisch-numerischen Analyse eines dezentralen Lastmanagements durch Frequenz-Preis-Kopplung unter einfachen aggregierten Annahmen über Einspeise- und Entnahmeentscheidungen	<u>Veröffentlichung</u> : <i>The impact of model detail on power grid resilience measures</i> . [Auer2016b]
Wissenschaftliche <u>Veröffentlichung</u> zu neuartigen systemischen Risiken und Gegenmaßnahmen in frequenzgesteuerten Smart Grids	<u>Veröffentlichung</u> : <i>Deciphering the imprint of topology on nonlinear dynamical network stability</i> . [Nitzborn2017]
Wissenschaftliche <u>Veröffentlichung</u> zur Spannungsdynamik und -stabilität bei dezentralem Lastmanagement	Arbeit an Spannungsdynamik und numerischen Algorithmen in PyPSD im Rahmen einer Bachelor- und Masterarbeit [Jarolin2018]
III.3 Dezentrale Smart Grids u. Aggregation	
<u>Bericht</u> über die identifizierten Agenten, Handlungsmuster, und emergenten Phänomene in komplexen Handelsnetzwerken bei dezentraler Aggregation	Zwei <u>Veröffentlichungen</u> Anstelle des Berichts: [Auer2016a] , [Schäfer2016]
Wissenschaftliche <u>Veröffentlichung</u> zur agentenbasierten Simulation eines dezentralen Lastmanagements durch Frequenz-Preis-Kopplung unter Annahme verschiedener Formen von individueller Verbrauchsoptimierung und heterogener Agenten	<u>Veröffentlichung</u> : <i>The Contribution of Different Electric Vehicle Control Strategies to Dynamical Grid Stability</i> [Auer2017b]
Wissenschaftliche <u>Veröffentlichung</u> zum Preis- und Mechanism-Design und der ökonomischen Effizienz eines dezentralen Lastmanagements durch Frequenz-Preis-Kopplung	<u>Veröffentlichung</u> : <i>Comparison of electricity market designs for stable decentralized power grids</i> . [Heitzig2017]
Wissenschaftliche <u>Veröffentlichung</u> zum Ausbau des Verbundnetzes für einen stabilen dezentralen Betrieb	Masterarbeit [Jarolin2018] und eine <u>Veröffentlichung</u> : <i>Stability of meshed DC microgrids using probabilistic analysis</i> [Strenge2017]

Tab. 1: Vereinbarte Projektziele und erzielte Projektergebnisse

Das Verwertungspotential der erzielten Ergebnisse wird in Abschnitt II.4 diskutiert.

An dieser Stelle sei noch einmal auf die Neuartigkeit der jeweiligen Erkenntnisse hingewiesen.

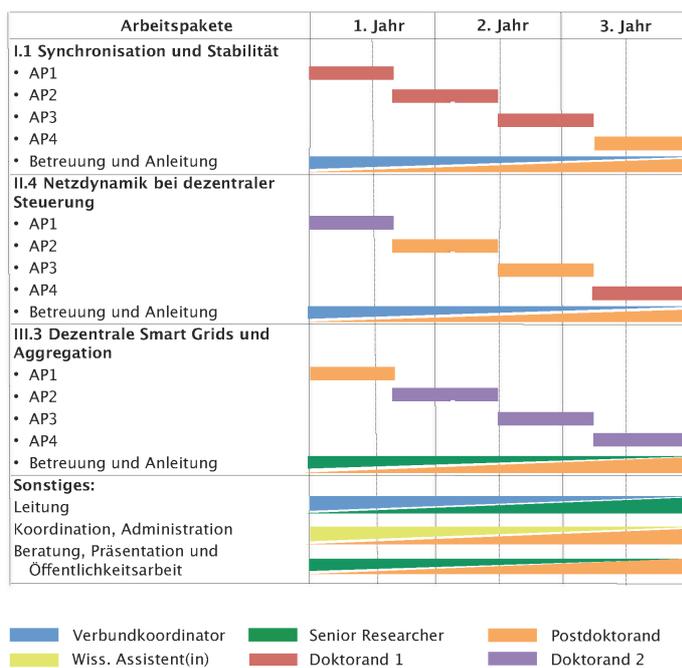
Im Bereich „Synchronisation und Stabilität“ ist insbesondere die Entwicklung einer probabilistischen Stabilitätsanalyse für komplexe Systeme zu nennen (Bassin-Stabilität, Survivability).

Der Vorteil dieser neu etablierten Methode ist, dass sich systematisch die Multistabilität hochdimensionaler – und damit allgemeine deutlich realistischerer – Netzwerkmodelle jenseits einer Linearisierung sehr effizient analysieren lässt. Weiterhin hat die Untersuchung von realen sowie von Zufallsstromnetzwerken ergeben, dass signifikante Zusammenhänge zwischen probabilistischen Maßen und der Netzwerktopologie auftreten. Dies hat zu einem neuartigen Verständnis dynamischer Effekte auf Basis der Netzwerkstruktur, sowie einer Heuristik für Netzdesignempfehlungen geführt. Eine interessante Weiterentwicklung für die Zukunft wäre die Anwendung maschinellen Lernens um schnelle und effektive Schätzungen der Stromnetzstabilität für Anwender zu erzeugen.

Im Bereich „Netzwerkdynamik bei dezentraler Steuerung“ hat die Untersuchung verzögerter Reaktionen in Energiesystemen ein neues Verständnis auftretender Instabilitäten, insbesondere in (zukünftigen) wechselrichterdominierten Netzen, ergeben. Weiterhin wurden Gegenmaßnahmen zu solchen und anderen systemischen Risiken auf Grundlage bestimmter topologischer Muster entwickelt. Dieser gesamt-systemische Ansatz zur Analyse von Risiken in gekoppelten Energiesystemen jenseits der Betrachtung einzelner Maschinen wurde zuvor, insbesondere in den angewandteren Ingenieurwissenschaften, kaum verfolgt. Die methodische Grundlage ist hierbei auch die neuartige probabilistische Stabilitätsanalyse.

Auch im Bereich „Dezentrale Smart Grids und Aggregation“ gibt es wesentliche neuartige Erkenntnisse, vor allem zu Tarif- und Marktdesigns in dezentralen Strommärkten, sowie zu Stabilität bzw. Design von Smart Grids und Verteilnetzen im Allgemeinen.

II.1.3 Beteiligte Mitarbeiter*innen



Aus Projektmitteln wurden über die Gesamtlaufzeit ein Postdoktorand, zwei Doktoranden, verschiedene Studentische Hilfskräfte sowie eine wissenschaftliche Assistenz des Verbundkoordinators entsprechend der Projektmittelbewilligung finanziert.

Abb. 2: Balkenplan gemäß Vorhabenbeschreibung PIK

Die Positionen innerhalb des Projektes wurden wie folgt besetzt:

- Verbundkoordinator: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Jürgen Kurths
- Wiss. Assistentin: Anja Bruhn (bis 02/2016)
Heike Prietzel (ab 04/2016)
- Senior Researcher: Dr. Jobst Heitzig
- Postdoc: Dr. Carsten Grabow (bis 09/2015)
Dr. Frank Hellmann (ab 06/2015)
- Doktoranden: Sabine Auer
Paul Schultz
- Studierende: Maria Jarolin, Kirsten Kleis, Jakob Kolb, Till Kolster, Marie Krause,
Michael Lindner, Jan Nitzbon, Anton Plietzsch, Caspar Roos

Aus dem Projekt gingen folgende universitäre Abschlussarbeiten hervor (Einreichungsdatum):

- PhD - Sabine Auer: *The Stability and Control of Power Grids with High Renewable Energy Share* (11/2017)
- PhD - Paul Schultz: *Stability Concepts of Networked Infrastructure Networks* (11/2017)
- MSc - Anton Plietzsch: *Asymptotic Dynamical States in Networks of Kuramoto Oscillators with Inertia*. (12/2017)

- MSc - Maria Jarolin: *Analysis of the stability of a network of Mid-Voltage-microgrids integrating renewable energies* (12/2017)
- MSc - Michael Lindner: *Stochastic Basins of Attraction*. (Einreichung nach Projektende)
- MSc - Caspar Roos: *Decentral Smart Grid Control: How different EV control strategies affect the dynamical grid stability* (07/2016)
- BSc - Marie Krause: *Runge-Kutta Methods for Stochastic Differential-Algebraic Equations*. (08/2016)

II.1.4 Kooperationen

II.1.4a Wissenschaftliche Kooperation mit den Verbundpartnern

Es gab einen intensiven inhaltlichen Austausch mit allen vier wissenschaftlichen Verbundpartnern.

- **Frankfurt Institute für Advanced Studies (FIAS):**

Mit dem FIAS in Frankfurt / Main wurde in Zusammenarbeit mit Tom Brown ein Projekt entworfen, um den notwendigen Modellierungsgrad von dynamischen Stromnetzen mit Hilfe von Netzwerken von Netzwerken zu untersuchen. Dieses Projekt wurde 2017 von Praktikanten weitergeführt und auf der SciGRID Konferenz vorgestellt. Zudem haben wir verstärkt mit dem FIAS in der Open-Source-Entwicklung zusammengearbeitet. Die dort im Rahmen von CoNDyNet entwickelte Software zur statischen Systemoptimierung, PyPSA, stellt den Rahmen für unsere eigenen Software zur Untersuchung dynamischer Systemeigenschaften dar. Gemeinsames Ziel über das Verbundprojekt hinaus ist es ist es unseren Programmiercode in die rechen-effiziente Programmiersprache Julia zu transferieren, unter dem Namen DPSA.jl. Dies erfolgt in enger Kooperation mit dem FIAS, die zeitgleich ihr Open-Source-Tool für statische Netzanalysen PyPSA in PSA.jl ebenso in Julia transferieren.

- **Jakobs University Bremen (JUB):**

Mit der Jacobs University Bremen erfolgte ein reger Austausch zwischen der PIK-Doktorandin Sabine Auer und dem Bremer Post-Doc Mario Mureddu zur Modellierung des italienischen Regelenergiemarktes. Dabei konnten viele Erkenntnisse über die methodischen Möglichkeiten zum Aufbau einer solchen Modellierung, wie z.B. das von Mario Mureddu genutzte Reinforcement Learning, gewonnen und für zukünftige Projekte nutzbar gemacht werden. Der Austausch dazu erfolgte auf den Dynamics Days Europe und den regelmäßigen CoNDyNet-Projekttreffen. Außerdem haben wir erfolgreich mit der JUB zum Thema Tarif-Design (TPIII.3 AP3) zusammengearbeitet woraus eine gemeinsame Publikation entstanden ist [Heitzig2017].

- **Forschungszentrum Jülich (FZ):**

Der intensive Austausch mit dem FZ Jülich und dem MPI Dresden hat zu einer gemeinsamen Publikation geführt [Schäfer2016].

- **Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation (MPIDS):**

Die Kooperation mit dem MPI Göttingen gestaltete sich seit Projektbeginn als eine enge Zusammenarbeit, welche zu einer gemeinsamen Publikation [Schäfer2016] führte. Über das Projekt hinausgehende, weiterführende gemeinsame Arbeiten zur Modellierung von Wechselrichterdynamiken wurden bereits mit Benjamin Schäfer eingeleitet. Außerdem gab es ein großes gemeinsames Thema in der Untersuchung zu Fluktuationen. Xiaozhu Zhangs Arbeiten zum Einfluss von monochromatischen Einzelknotenfluktuation verschiedener Frequenzbereiche auf die stochastische Netzstabilität, erlaubten eine theoretisch fundierte Analyse unserer eigenen Arbeiten zu realistischen Fluktuationen in Verteilnetzen. Weitere gemeinsame Arbeiten zu diesen Themen sind in Planung.

II.1.4b Wissenschaftliche Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen

- **ForWind (Oldenburg):** Die Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Joachim Peinke und seinen beiden Doktorandinnen Mehrnaz Anvari und Kathrin Schmietendorf bildete die Grundlage für zwei Publikationen [Auer2017a], [Auer2017b]. Hier wurden die realistischen Modelle für intermittente Wind- und Solarfluktuationen der Oldenburger verwendet. Diese sind in diesem Bereich weltweit führend.
- **Freie Universität Berlin:** Im Rahmen einer Zusammenarbeit der der FU Berlin haben wir mit Dr. Péter Koltai neue Methoden zur Definition von Stabilitätsmaßen auch für stochastische Systeme entwickelt. Diese ermöglichen es, entsprechende Maße auch direkt auf Stromnetze mit unsicheren Einspeisereihen anzuwenden.
- **IWES, Kassel:** In der ersten Hälfte der Projektlaufzeit gab es einen regelmäßigem Austausch mit verschiedenen Arbeitsgruppen des Fraunhofer-Instituts, bei dem wir uns über Ansätze zur Modellierung komplexer Stromnetze verständigt haben. In der zweiten Projekthälfte bestand besonders zur Prof. Martin Braun ein reger Kontakt. Die Möglichkeit künftiger gemeinsamer Projekte wird dabei laufend eruiert.
- **SciGRID, Oldenburg:** Die Zusammenarbeit mit dem Projekt "SciGRID" seit dem Frühjahr 2015 gestaltete sich als sehr wichtig für uns, da das Projekt regelmäßig validierte und mit Parametern versehene Netztopologien für das deutsche Übertragungsnetz bereitstellt, welche wir als Grundlage für Simulationen nutzen. Im Frühjahr 2017 haben wir auch auf der von SciGRID organisierten Konferenz „SciGRID International Conference on Power Grid Modelling“ unsere Ergebnisse vorgestellt.
- **Technische Universität Berlin:** Mit Prof. Raisch (Lehrstuhl Regelungssysteme in der Fakultät Elektrotechnik und Informatik) entwickeln wir aufbauend auf unseren methodischen Arbeiten neuartige auf Selbstorganisation basierende Regelkonzepte für Stromnetze. Der Fokus lag zunächst auf DC-Netzen, die im Rahmen des Ausbaus der HVDC-Leitungen auf europäischer Ebene, sowie in Microgrids relevant werden. Im nächsten Schritt wird in einem gemeinsamen Projekt der bislang kaum erforschte Betrieb gekoppelter AC- und DC-Netze untersucht. Durch die interdisziplinäre

Verbindung unserer Methoden haben wir eine gemeinsame Publikation [Streng2017] und Folgeprojekte ermöglicht.

II.1.4c Kooperationen mit Industriepartnern

- **Expertennetzwerk „Strommarkttreffen“, Berlin:** Das Expertennetzwerk Strommarkttreffen in Berlin bringt Experten aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft zusammen. Dort werden eine Vielzahl an Energiethemen von verschiedenen Perspektiven auf höchstem Niveau diskutiert. An den Treffen haben wir regelmäßig teilgenommen.
- **Renewable Grid Initiative/Energynautics:** Aus mehreren Gesprächen mit der Renewable Grid Initiative, einer Kooperation aus Industriepartnern und Bürgerbewegungen, ging eine Mitarbeit an einem EU Horizon 2020 Call zum Thema der Modellierung des Netzbedarfs unter Einbeziehung aller Stakeholder hervor. Des Weiteren ermöglichte der enge Kontakt zu RGI auch immer wieder mit Stakeholdern in Kontakt zu treten.
- **Siemens Corporate Technology:** Die Kooperation mit Siemens CT in München als assoziiertem Industriepartner wurde direkt zu Projektbeginn aufgenommen. In diesem Rahmen fanden bilaterale Treffen und häufige Telefonkonferenzen zwischen Florian Steinke, Rudolf Sollacher und Andrei Szabo der Siemens AG und der am PIK arbeitenden Doktorandin Sabine Auer statt. Inhalt dieser Kooperation war die Abschätzung des Blindleistungspotentials aus dem Verteilnetz für ein 100%-Erneuerbare-Energie-Szenario (EE) für Deutschland. Dabei stellten die Mitarbeiter der Siemens AG ihre Expertise zur Lastflussmodellierung und detaillierte Datensätze zu dem 100%-EE-Szenario zur Verfügung. Ergebnis der Zusammenarbeit ist eine gemeinsame wissenschaftliche Veröffentlichung [Auer2016a].
- **SolShare / Micro Energy Systems:** In Zusammenarbeit mit Micro Energy Systems und SolShare wurde die Anwendbarkeit unserer Ergebnisse auf selbstorganisierte Stromnetze im globalen Süden untersucht. Im Rahmen dieser Kooperation sind wir momentan an einem Antrag im Client II Programm des BMBFs mit Schwerpunkt West Afrika involviert.
- **SWIPO/Aria Technologies, Paris:** Das CoNDyNet Projekt am PIK hat in der ersten Jahreshälfte eng mit dem auslaufenden EU-finanzierten Climate-KIC Projekt SWIPO zusammengearbeitet. SWIPO war ein Verbundprojekt mit Aria Technologies in Paris, Frankreich, und dem IPSL, mit dem Ziel, die praktische Anwendbarkeit von dynamischen Stabilitätsmaßen zu untersuchen. Im Rahmen von SWIPO konnten eine Vielzahl von Gesprächen mit Industrieexperten geführt werden, an denen Paul Schultz, Frank Hellmann und Jobst Heitzig beteiligt waren.
- **XRG Simulations GmbH, Hamburg:** In der ersten Hälfte der Projektlaufzeit entstand aus der Beschäftigung mit der Modellierung von Maschinen im Stromnetz und einer Kooperation mit XRG Simulations GmbH in Hamburg ein weiteres EU-finanziertes Climate-KIC Projekt zur Modellordnungsreduktion, primär zur effektiven Modellierung von gekoppelten Strom-, Gas- und Elektrizitätsnetzen.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Tabellarische Aufstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises. Die Angaben werden außerdem detailliert im Verwendungsnachweis aufgelistet.

	<i>Bewilligte Ausgaben gemäß Gesamt- finanzierungsplan</i>	<i>Tatsächlich verausgabte Beträge</i>
Personalausgaben		
Beschäftigte E12-E15	441.236,00	455.317,40
Beschäftigte E1-E11	74.692,00	72.224,50
Beschäftigungsentgelte	15.509,00	16.747,29
Sächliche Verwaltungsausgaben		
Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben (Overhead, Abschlusskonferenz, Literatur etc.)	104.730,00	97.181,19
Dienstreisen	28.437,85	23.516,73
Gesamtbudget	664.604,85	664.987,11

Tab. 2: Zahlenmäßiger Nachweis

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ohne die spezielle Förderung wäre diese Forschungsarbeit nicht möglich gewesen. In Anbetracht der Herausforderungen der Energiewende sowie der vielfach dargelegten Notwendigkeit ganzheitlicher Modellierung und Stabilitätsbetrachtung halten wir lediglich einen umfassend interdisziplinären Ansatz für angemessen. Nur in einem Verbundprojekt, so wie es gefördert wurde, war es möglich die jeweilige Expertise kreativ und erfolgreich zu vereinen um neuartige Lösungen zu finden. Am PIK lag der Fokus in CoNDyNet auf mathematischen Methoden zur Analyse kollektiver dynamischer Phänomene in Energiesystemen und der sozioökonomischen Modellierung von Marktwechselwirkungen. Dieses Vorhaben an der Schnittstelle von Mathematik, Physik, Ökonomie, Regelungs- und Elektrotechnik ist so bisher einmalig. Wie bereits im Antrag dargelegt ließ sich außerhalb der Forschungsinitiative „Zukunftsfähige Stromnetze“ keine geeignete Ausschreibung für solch ein interdisziplinäres Verbundprojekt identifizieren.

II.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen

Es wurden keine Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen gemacht bzw. in Anspruch genommen und keine Schutzrechte erteilt

Wissenschaftliche/Technische Verwertung

Die Ergebnisse der Forschung haben zu einer Vielzahl an Publikationen in hochrangigen Zeitschriften und Vorträgen in wissenschaftlichen Konferenz geführt. Des weiteren wurden Prototypen zur dynamischen Simulation von Stromnetzen speziell für den wissenschaftlichen Kontext entwickelt. Im Rahmen der Projektarbeit wurde, wie bereits erwähnt, ein neues Forschungsfeld in Deutschland etabliert.

Um dieses Forschungsfeld weiter zu bearbeiten wurde nach Projektende am PIK die Projektgruppe CoEN, *Complex Energy Networks*, gegründet. In diesem Rahmen organisieren wir zur Zeit eine Sonderausgabe der Fachzeitschrift „Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science“ und veranstalten eine Fokussession auf der renommierten Konferenz „Dynamics Days Europe“ im September 2018.

Eine Weiterentwicklung der Ergebnisse in Richtung der etablierten Ingenieurwissenschaften und hin zu hierarchischen Regelungskonzepten wird durch die erfolgreiche Zusammenarbeit mit der TU Berlin im DFG Projekt 1984 zu hybriden Energiesystemen sichergestellt.

Eine weitere Verwertungsperspektive ist die Übertragung der erzielten Ergebnisse auf den Green-Field-Fall, komplett neu zu planender Energiesysteme in Entwicklungsländern. Dazu wurde zusammen mit Microenergy und SolShare ein Antrag bei der Client II Förderschiene beim BmBF eingereicht.

Neben dem Wissenstransfer in andere Forschungsprojekte planen wir die Erkenntnisse aus CoNDyNet in einer Vorlesung „Dynamik komplexer Netzwerke“ im Wintersemester 2018 an der Humboldt-Universität in die Lehre einzubringen.

Wirtschaftliche Verwertung

Um die wirtschaftlichen Verwertung sicherzustellen wurde in der gesamten Projektlaufzeit ein intensiver Austausch mit einer Vielzahl an Unternehmen gepflegt. Dieser Austausch wurde besonders auf der Abschlusskonferenz noch einmal deutlich, die eine einmalige Plattform für den Austausch zwischen Unternehmen, Akteuren der Zivilgesellschaft und Wissenschaftlern bot.

Insbesondere auf Basis der in entwickelten ganzheitlichen Stabilitätsbewertungskonzepte verfolgen wir den kommerziellen Forschungstransfer im Rahmen eines Spin-Offs⁸ „elena International“ unter der Führung von Dr. Sabine Auer, einer ehemaligen Doktorandin aus CoNDyNet, sowie weiteren PIK-Mitarbeitern. Der Fokus liegt dabei auf einer softwarebasierten Beratungsleistung für Netzbetreiber und Microgrids, die Transferförderung erfolgt durch Climate-KIC sowie ein angestrebtes EXIST-Gründerstipendium. Darüber hinaus setzen wir darauf unsere erarbeitete Expertise zur dynamischen Modellierung von Stromnetzen in Open-Source-Software (PyPSD, PyBAOBAP) bereitzustellen, die sowohl neuartige Komponenten als auch eine alternative zu kommerziellen Black-Box-Modellen bietet. Mittelfristig angestrebt sind darauf aufbauende kommerzielle Softwaretraining- und Beratungsleistungen in einem Transferprojekt.

Auf der wirtschaftlichen Seite steht ein unmittelbares Interesse, insbesondere von Energieversorgern und Verteilernetzbetreibern¹, an neuartigen Lösungen zur Netzregelung und -planung. Die zunehmend dezentrale Energieerzeugung in Verteilnetzen führt zu einem grundsätzlich geänderten dynamischen Verhalten² und der Notwendigkeit dezentrale Systemdienstleistungen, beispielsweise mittels Wechselrichtern, bereitzustellen.

Die Konzepte für ein dezentral gesteuertes Smart-Grid auf Basis einer Frequenz-Preis-Kopplung fließen in die Aktivitäten der Easy Smart Grid GmbH ein, welche aus dem industriellen Kooperationspartner WIRSOL Integrated PV Solutions GmbH hervorging.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

⁸ Webpräsenz: elena-international.com

Wie bereits beschrieben haben wir aus CoNDyNet heraus ein neues Forschungsfeld zu kollektiven Phänomenen in Energiesystemen etabliert. Dabei ergeben sich aus den erzielten Ergebnissen neue offene Fragen, insbesondere zu Transferoptionen auf konkrete Anwendungen. Ein wichtiger nächster Schritt wäre beispielsweise ein besseres Verständnis der Ausbreitung von intermittenten Fluktuationen in verlustbehafteten Netzen und deren Wechselwirkung mit Ausfallkaskaden. Der erarbeitete Forschungsvorsprung versetzt uns in die einmalige Position, ein Anschlussprojekt mit sehr hoher Erfolgswahrscheinlichkeit verfolgen zu können.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen

Gründliche Literaturrecherchen entsprechend Nr. 2.1 BNBest-BMBF 98 sowie zusätzliche Informationsrecherchen (elektronische Quellen wie Citation Alerts bzw. Suchen in einschlägigen Literaturdatenbanken) erfolgten regelmäßig. Während der Projektlaufzeit ergaben sich keine externen Ergebnisse, welche die Durchführung des Vorhabens entscheidend beeinflussten. Vielmehr wurden relevante Ergebnisse stets in die wissenschaftliche Arbeit einbezogen.

Das Verbundprojekt CoNDyNet hat erfolgreich theoretische Physiker und Ökonomen mit Anwendern zusammengebracht, um eine Vielzahl an Themen der Energiewende mit einem interdisziplinären Methodenspektrum zu beleuchten. Dadurch sind in Deutschland eine neue, weltweit bislang einzigartige Forschungsgemeinschaft und ein neues Forschungsfeld zu kollektiven Phänomenen und Dynamik in Stromnetzen und Energiesystemen entstanden.

Vor Beginn des Projektes fand diese Forschung nur durch vereinzelte Experten statt. Neu und ein absolutes Alleinstellungsmerkmal ist die Vernetzung von Experten im Bereich kollektiver Phänomene in Stromnetzen. Die Aktualität und Relevanz dieser Forschung spiegelt sich auch darin wieder, dass die Mitglieder des Verbundes nicht nur immer häufiger sowohl zu Physik- als auch zu ingenieurwissenschaftlichen Konferenzen und Kolloquien eingeladen werden, sondern zudem auch aus Industrie und Gesellschaft angefragt werden, Ihre Ergebnisse der Stromnetzforschung vorzustellen.

Den Mitgliedern des Verbundprojektes ist es gelungen, eine gemeinsame Sprache mit Ingenieuren und Netzbetreibern zu finden. Die Forschung strahlt damit nicht nur in die Physik, sondern auch in die Ingenieurwissenschaften und die Energiewirtschaft aus: Zentrale Anwender wie Siemens und 50Hertz kooperieren mit uns und kommen wegen unserer Forschungsergebnisse auf uns zu.

Auch im internationalen Vergleich gibt es kein vergleichbares Netzwerk. CoNDyNet ist damit mit seinem breiten Spektrum an Grundlagenforschung derzeit führend im Bereich der Forschung zu kollektiven Phänomenen und Dynamik in Stromnetzen und Energiesystemen.

II.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden zum Hauptteil in wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert. Darüber hinaus haben wir die Publikationen in zahlreichen Konferenzbeiträgen bekannt gemacht.

Neben der wissenschaftlichen Gemeinschaft gelang es auch durch populärwissenschaftliche Artikel, Anwenderkonferenzen sowie Veranstaltungen wie die „Lange Nacht der Wissenschaften“ ein breiteres Publikum zu erreichen.

II.6.1 Wissenschaftliche Publikationen

Die Forschungsergebnisse wurden in 25 wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht.

- [Auer2015] *The Dynamics of Coalition Formation on Complex Networks*. Auer, S. Heitzig, J. Kornek, U. Schöll, E. Kurths, J., *Nature Scientific Reports* 5, 13386; (2015)
- [Auer2016a] *Can Distribution Grids Significantly Contribute to Transmission Grids' Voltage Management?* Auer, S. Steinke, F. Chunsen, W. Szabo, A. Sollacher, R., *IEEE ISGT* (2017)
- [Auer2016b] *The impact of model detail on power grid resilience measures*. Auer, S., Kleis, K., Schultz, P., Kurths, J., Hellmann, F. *European Physical Journal-Special Topics*, 225(3), 609-625 (2016)
- [Auer2017a] *Stability of Synchrony against Local Intermittent Fluctuations in Tree-like Power Grids*. Auer, S., Hellmann, F., Krause, M., Kurths, J., *Chaos* 27 (2017)
- [Auer2017b] *The Contribution of Different Electric Vehicle Control Strategies to Dynamical Grid Stability*. Auer, S., Roos, C., Heitzig, J., Hellmann, F., Kurths, J., arXiv:1708.03531 (2017).
- [Auer2018] *Dynamics and Control of Power Grids with High Renewable Energy Share*. Sabine Auer, Dissertation, Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin (2018)
- [Goswami2017] *Inferring Interdependencies from Short Time Series*. Goswami, B. Schultz, P. Heinze, Bodirsky, B., Lotze-Campen H., Kurths, J., *Indian Academy of Sciences – Conference Series*, 1(1), 51–60 (2017)
- [Hellmann2016] *Survivability of Deterministic Dynamical Systems*. Hellmann, F., Schultz, P., Grabow, C., Heitzig, J., Kurths, J. *Nature Scientific Reports*, 6, 29654 (2016)
- [Heitzig2017] *Comparison of electricity market designs for stable decentralized power grids*. Heitzig, J., Meyer-Ortmanns, H., Auer, S., arXiv:1704.04644 (2017)
- [Jarolin2018] *Analysis of the Stability of a network of Mid-Voltage-Microgrids integrating Renewable Energies*, Jarolin, M., Masterarbeit TU Berlin (2018)
- [Lindner2018] *Stochastic basins of attraction and generalized committor functions*. Linder, M., Hellmann, F., submitted to *Chaos*, arXiv:1803.06372 (2018)
- [Mureddu2015] *Green power grids: How energy from renewable sources affects networks and markets*. Mureddu, M., Caldarelli, G., Chessa, A., Scala, A., & Damiano, A. *PLoS one*, 10(9), e0135312 (2015)
- [Nitzborn2017] *Deciphering the imprint of topology on nonlinear dynamical network stability*. Nitzbon, J., Schultz, P., Heitzig, J., Kurths, J., Hellmann, F. *New Journal of Physics* 19(3), 033029 (2017).
- [Plietzsch2016] *Local vs. global redundancy -- trade-offs between resilience against cascading failures and frequency stability*. Plietzsch, A., Schultz, P., Heitzig, J., Kurths, J., *European*

Physical Journal-Special Topics, 225(3), 551-568 (2016)

[Plietzsch2017] *Asymptotic Dynamical States in Networks of Kuramoto Oscillators with Inertia*.

Plietzsch, A. Masterarbeit HU Berlin (2017)

[Schäfer2016] *Taming Instabilities in Power Grid Networks by Decentralized Control*. Schaefer, B.,

Grabow, C., Auer, S., Kurths, J., Witthaut, D., Timme, M. Eur. Phys. J. ST 225, 569 (2016)

[Schultz2014a] *A random growth model for power grids and other spatially embedded*

infrastructure networks. Schultz, P., Heitzig, J., Kurths, J., European Physical Journal-Special Topics, 223(12), 2593-2610, (2014)

[Schultz2014b] *Detours around basin stability in power networks*. Schultz, P., Heitzig, J., Kurths, J.

New Journal of Physics, 16, (2014)

[Schultz2016a] *A Network of Networks Approach to Interconnected Power Grids*. Schultz, P.,

Hellmann, F., Heitzig, J. & Kurths, J., arxiv:1701.06968 (2016)

[Schultz2016b] *Tweaking synchronization by connectivity modifications*. Schultz, P., Peron, T., Eroglu, D.,

Stemler, T., Ramirez, G. M., Rodrigues, F. A., Kurths, J., Physical Review E, 93(6), 062211 (2016)

[Schultz2017] *Potentials and limits to basin stability estimation*. Schultz, P., Menck P.J., Heitzig, J.,

Kurths, J. NJP 19(2), (2017)

[Schultz2018] *Bounding the first exit from the basin: Independence Times and Finite-Time Basin*

Stability. Schultz, P.; Hellmann, F.; Webster, K.; Kurths, J., Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 28(4), 043102 (2018)

[Schultz2018a] *Stability Concepts of Networked Infrastructure Networks*. Paul Schultz, Dissertation,

Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin (2018)

[Streng2017] *Stability of meshed DC microgrids using probabilistic analysis*. Streng, L., Kirchhoff, H.,

Ndow, L. G., Hellmann, F., DC Microgrids (ICDCM), IEEE Second International Conference on DC Microgrids (2017)

[Sun2017] *Power-functional network*. Sun, Y., Kurths, J., Zhan, M. Chaos 27, 083116 (2017)

II.6.2 Fachvorträge und Präsentationen

2017:

- Kurths, Jürgen: „Basin stability for quantifying stability of deterministic and stochastic systems“, 6th National Conference on Stochastic Dynamics, Weihai (China), Plenumsvortrag 15.10.2017.
- Schultz, Paul: „Independence Times and Finite Time Basin Stability“, PIK Internal Complexity Days, 06.10.2017.
- Schultz, Paul: „Sampling-based Power Grid Stability“, Workshop on Electrification and Climate from the Bottom Up Perspective in West Africa (PIK), 04.10.2017.
- Auer, Sabine. “Microgrids als Blueprint für eine Stabile Stromsystemtransformation”. Strommarkttreffen, Berlin, 22.09.2017.
- Kurths, Jürgen: Risks and dynamics in future power systems under climate change, Conference Computational Sciences for Future Energy, Eindhoven, Plenumsvortrag 20.09.2017.

- Auer, Sabine. "The Resilience and Robustness of Power Grids with High Shares of Renewables". Chapman Chair Lecturers, UAF Fairbanks, Alaska, 31.8.2017.
- Hellmann, Frank: „The dynamical System Perspective: Probabilistic Methods and Conceptual Models“, Client II Workshop, Dakar, 15.7.2017.
- Plietzsch, Anton: Stability of Synchronous Clusters in Networks of Kuramoto Oscillators with Inertia. Nesin Mathematics Village, Selçuk , Kurzvortrag 04.07.2017.
- Schultz, Paul: Nesin Math Village Izmir (Turkey), Diverse Research Talks, 02.07.-09.07.2017.
- Hellmann, Frank: Nesin Math Village Izmir (Turkey), Diverse Research Talks, 02.07.-09.07.2017.
- Heitzig, Jobst: Stability and Resilience of Power Grids, PIK Potsdam, Vortrag vor Studierenden der University of Pennsylvania, 23.6.2017.
- Kurths, Jürgen: Quantifying stability in power grids, Symposium Controlling Complex Networks: from Biological to Social and Technological Systems, Indianapolis, eingeladener Vortrag 19.06.2017.
- Auer, Sabine. "Power Grid Resilience and Robustness in the Face of the Energy Transition". ConDyNet Conference ('Dynamics in Power Systems'), PIK Potsdam, 13.06.2017.
- Plietzsch, Anton: Stable limit cycles in sparse networks of Kuramoto oscillators with inertia. CoNDyNet Conference ('Dynamics in Power Systems'), PIK Potsdam, Poster 13.06.2017.
- Hellmann, Frank. "The dynamical System Perspective: Probabilistic Methods and Conceptual Models". ConDyNet Conference ('Dynamics in Power Systems'), PIK Potsdam, 12.06.2017.
- Kurths, Jürgen: Power grid stability, Conference Crossroads in complex systems, Mallorca, eingeladener Vortrag 06.06.2017.
- Auer, Sabine. "Power Grid Resilience and Robustness in the Face of the Energy Transition". Oulu University, Finland, 01.06.2017.
- Hellmann, Frank: „Sampling-based methods for analysis of dynamical systems on networks“, PIK Internal Complexity Days, 05.04.2017.
- Auer, Sabine. "Topology-related Instabilities driven by Single-Node Intermittent Fluctuations in Distribution Grids" ScigrId Conference, Oldenburg, 31.03.2017.
- Schultz, Paul: Enhancing SciGRID with distribution grids – A network of networks model, SciGRID International Conference on Power Grid Modelling, Poster, 30.03.2017
- Plietzsch, Anton: Asymptotic frequency spectrum of Kuramoto oscillators with inertia on sparse networks. DPG Frühjahrstagung, Dresden, Poster 23.03.2017.
- Schultz, Paul: Finite Time Basin Stability & Basin Escape Rates, DPG Frühjahrstagung Dresden, 23.03.2017.
- Hellmann, Frank: „Sampling based methods for analysis of dynamical systems on networks“, DPG Frühjahrstagung Dresden, 16.03.2017.
- Auer, Sabine. "Topology-related Instabilities Driven by Single-Node Intermittent Fluctuations in Distribution Grids". DPG, Dresden, 22.02.2017.
- Auer, Sabine. "Topology-related Instabilities driven by Single-Node Intermittent Fluctuations in Distribution Grids". University of Osnabrück, 14.02.2017.
- Schultz, Paul: Power Grid Stability and Control – How Networks Matter, PIK Research Days, 07.02.2017.
- Kurths, Jürgen: Basin stability for quantifying stability in power grids, Konferenz ‚Future Electric Power Systems and the Energy Transition‘, Champéry (Schweiz), eingeladener Vortrag 6.2.2017

2016:

- Hellmann, Frank: Sampling based methods for stability analysis of dynamical systems on networks. CoNDyNet Industry Workshop, Frankfurt/M, eingeladener Vortrag 23.11.2016.
- Schultz, Paul: Identification of Critical Structures Using Sampling-Based Approaches. CoNDyNet Industry Workshop, Frankfurt/M, eingeladener Vortrag 23.11.2016.
- Auer, Sabine: Intermittent Renewables & Dynamic Stability in Distribution Grids. CoNDyNet Industry Workshop, Frankfurt/M, eingeladener Vortrag 23.11.2016.

- Hellmann, Frank: Sampling based methods for dynamical Systems, BTU Cottbus, eingeladener Vortrag 14.11.2016.
- Schultz, Paul: Stability Analysis of Complex Networks – Applications to Power Grids. Research Training Group ‘NatRisk Change’, Potsdam, eingeladener Vortrag 11.10.2016.
- Auer, Sabine: Can Distribution Grids Significantly Contribute to Transmission Grids’ Voltage Management? IEEE ISGT Europe 2016, Slowenien, eingeladener Vortrag 10.10.2016.
- Heitzig, Jobst: Stability and Resilience of Power Grids. IRTG 1740 Workshop, Sao Carlos, Brasil, eingeladener Vortrag 04.10.2016.
- Heitzig, Jobst: Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze. Konferenz ‚Zukunftsfähige Stromnetze‘, Berlin, eingeladener Vortrag 23.09.2016.
- Hellmann, Frank: Synchronization in oscillator networks: The power-grid perspective. Conference Perspectives in Nonlinear Dynamics, Berlin, eingeladener Vortrag 27.06.2016.
- Schultz, Paul: Survivability – How Undesired Transients Affect The Stability of Dynamical Systems. Conference Perspectives in Nonlinear Dynamics, Berlin, Poster 24.07.2016.
- Auer, Sabine: Intermittent Power Sources in a Future Smart Grid. Conference Perspectives in Nonlinear Dynamics, Berlin, Poster 24.07.2016.
- Kurths, Jürgen: Complex Systems Science: A short journey from simple models and utopistic expectations to complex networks and applications to power grids CoNDyNet Summer School, Bremen, eingeladener Vortrag 26.06.2016.
- Heitzig, Jobst: Coalition formation between power grid operators as an example of possible strategic interactions caused by increases in renewable energy. CoNDyNet Summer School, Bremen, eingeladener Vortrag 23.06.2016.
- Auer, Sabine: Intermittent Power Sources in a Future Smart Grid, ForWind Seminar, Oldenburg University, eingeladener Vortrag 21.06.2016.
- Hellmann, Frank: Synchronization in oscillator networks: The power-grid perspective. TU-Berlin, eingeladener Vortrag 18.06.2016.
- Kurths, Jürgen: Stability of power grids, Coll., Mathematical Department, Northwestern University, Xi’an, eingeladener Vortrag 17.06.2016.
- Hellmann, Frank: Synchronization in oscillator networks: The power-grid perspective. Dynamics Days Europe, Corfu, eingeladener Vortrag 09.06.2016.
- Schultz, Paul: Stability Measures for High-Dimensional Multi-Stable Systems. Dynamics Days Europe, Minisymposium “Structure and Dynamics of Future Energy Systems: Power Grids as Complex Dynamical Systems”, Corfu, 08.06.2016.
- Auer, Sabine: The 2nd order Kuramoto model in a future power grid, Dynamics Days Europe, Corfu, eingeladener Vortrag 08.06.2016.
- Kurths, Jürgen: Basin stability and power grids, 14th Experimental Chaos and Complexity Conference, Banff (Canada), eingeladener Vortrag 16.05.2016.
- Kurths, Jürgen: Basin stability for quantifying stability of power grids, Workshop Critical and Collective Effects in Graphs and Networks, MIPT, Moscow, eingeladener Vortrag 26.04.2016.
- Kurths, Jürgen: Stability in Power Grids, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, Kolloquium, eingeladener Vortrag 28.03.2016.
- Schultz, Paul: Survivability – How Undesired Transients Affect The Stability of Dynamical Systems. DPG Frühjahrstagung, Regensburg, Poster 07.03.2016.
- Auer, Sabine: Generator Models & Demand Control for Future Renewable Energy Scenarios. DPG Frühjahrstagung, Regensburg, Poster 07.03.2016.
- Auer, Sabine / Schultz, Paul: Enabling Renewable Energies – The complex dynamical systems perspective. DPG Frühjahrstagung, Regensburg, eingeladener Vortrag 07.03.2016.
- Auer, Sabine / Hellmann, Frank: Enabling Renewable Energies – The complex dynamical systems perspective. PIK Research Days, Potsdam, Vortrag 22.1.2016.

2015:

- Schulz, Paul: "Synchronisation, Stability & Survivability: Developments in subproject I.2: WP1 & 2", CoNDyNet Szenarienworkshop Jülich, 16.12.2015

- Auer, Sabine, "The Impact of Model Detail on Power System Resilience Measures", CoNDyNet Szenarienworkshop Jülich, 17.12.2015
- Kurths, Jürgen, "Quantifying Stability in Complex Net-works: From Linear to Basin Stability", Applied Mathematics Seminar, Inst for Physical Science and Technology, University of Maryland, College Park, USA, 12.11.2015
- Schulz, Paul, "Survivability: Transient Resilience of Deterministic Systems", Workshop DyNeMo-Clim PIK Potsdam, 12.10.2015
- Auer, Sabine, "The Impact of Model Detail on Power System Resilience Measures", Workshop DyNeMo-Clim PIK Potsdam, 12.10.2015
- Heitzig, Jobst, "Stability and Resilience of Power Grids", 13th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, ICNAAM 2015, Rhodos, Griechenland, 24.09.2015
- Schulz, Paul, "Survivability: How Dangerous Transients Affect the Stability of Dynamical Systems" (Poster), DDE Exeter, 08.09.2015
- Auer, Sabine, "The Impact of Model Detail on Power Grid Resilience Measures" (Poster), ISES Summer School, Jülich, 08.09.2015
- Kurths, Jürgen, "Quantifying stability in complex networks", Workshop Advanced Computational and Experimental techniques in Nonlinear Dynamics, Cusco, Peru, 05.08.2015
- Schulz, Paul, "Tweaking Synchronisation by Link Addition", Sommerschule Nesin Math Village, 06.07.2015
- Kurths, Jürgen, "Network stability and power grids", HUST, Wuhan, China, 23.06.2015
- Kurths, Jürgen, "Quantifying stability in complex networks: from linear to basin stability", NETSCIS, Zaragossa, Spanien, 14.06.2015
- Heitzig, Jobst, "Stability and Resilience of Power Grids", Fourth International Workshop on Nonlinear Dynamics and Synchronization - INDS'15, Universität Klagenfurt, Österreich, 30.05.2015
- Schulz, Paul, "From (Basin) Stability to Survivability", Seminar PIK Potsdam, 26.05.2015
- Auer, Sabine, "The Impact of Model Detail on Power Grid Resilience Measures", Seminar PIK Potsdam, 26.05.2015
- Kurths, Jürgen, "Basin stability and power grids", SIAM Conf. Applications of Dynamical Systems, Snowbird, USA, 19.05.2015
- Kurths, Jürgen, "Stability analysis of complex networks", Int. Conf. Nonlinear Dynamics and Complexity, La Manga, Spanien, 12.05.2015
- Schulz, Paul, "Power Grid Stability: large perturbations in power grids", IWES Kassel, 27.04.2015
- Auer, Sabine, "The Challenge of Integrating Renewables into a coupled Power Market & Grid", IWES Kassel, 27.04.2015
- Schulz, Paul, "Basin Stability: large perturbations in power grids", Seminar Universität Oldenburg, 21.04.2015
- Schulz, Paul, "Detours around Basin Stability in Power networks", DPG-Tagung Berlin, 19.03.2015
- Auer, Sabine, "The induced feedback of Demand-Side Management in the German power market and grid", DPG-Tagung Berlin, 19.03.2015
- Hellmann, Frank, "Network Measures in Practice", DPG-Tagung, Berlin, 16.03.2015
- Kurths, Jürgen, "Basin stability for evaluating large perturbations in power grids", Conf. Nonlinear Systems and Dynamics, IISER Mohali, Indien, 14.03.2015
- Schulz, Paul, "Research on Power Grid Stability and Open Science Use Cases", Seminarvortrag Universität Göttingen 17.02.2015
- Schulz, Paul, "Power grids: Application of stability of nonlinear oscillator networks", WIAS Workshop, Berlin, 13.02.2015

2014:

- Sabine Auer: Research Questions Arising from the Challenge of Integrating VRE into the German Power Market Coupled to the Power Grid. Workshop & Symposium: Future Energy Systems - Collective Dynamics and Self-Organization of Power Grids, Göttingen, 12.12.2014.
- Paul Schultz: Challenges in Modelling Power Grids as Network Systems. Workshop & Symposium: Future Energy Systems - Collective Dynamics and Self-Organization of Power Grids, Göttingen, 12.12.2014.

- Jobst Heitzig: Coalition Formation between Power Grid Operators as an Example of Possible Strategic Interactions Caused by Increases in Renewable Energy. Workshop & Symposium: Future Energy Systems - Collective Dynamics and Self-Organization of Power Grids, Göttingen, 11.12.2014.
- Paul Schultz: Stability Analysis of Power Transmission Systems. Workshop & Symposium: Future Energy Systems - Collective Dynamics and Self-Organization of Power Grids, Göttingen, 10.12.2014.
- Carsten Grabow: Impact of Network Topology on Decentral Frequency-based Smart Grid Control. Workshop & Symposium: Future Energy Systems - Collective Dynamics and Self-Organization of Power Grids, Göttingen, 10.12.2014.
- Paul Schultz: Power Grid Stability: Impact of Small-Scale Structures on Network Resilience (Poster). HEECC 2014, Bad Honnef, 6.12-9.12.2014
- Sabine Auer: Preis "Best Ignite Talk on Health, Energy & Extreme Events in a Changing Climate". HEECC 2014, Bad Honnef, 6.12-9.12.2014.

II.6.3 Weitere Veröffentlichungen

Anwenderzeitschrift „EP - Elektropraktiker“, Juni 2016:



Abb. 3 Artikel

Im Rahmen der Zugänglichmachung der CoNDyNet-Forschungsergebnisse für eine breitere Öffentlichkeit und insbesondere die praktische Anwendung ist im Juni 2016 ein Artikel in der Anwenderzeitschrift „EP – Elektropraktiker“ erschienen (Abb. 3). Unter dem Titel ‚Volatil und doch stabil - Forschungen zur Förderung der erneuerbaren Energien‘ werden in dem fünfseitigen Artikel die im CoNDyNet-Projekt untersuchten spezifischen Herausforderungen und erarbeiteten Lösungen bei der Umstellung des deutschen Stromnetzen auf die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien für Elektropraktiker dargestellt. Der Artikel ist auch online abrufbar unter

<http://www.elektropraktiker.de/nc/fachinformationen/fachartikel/volatil-und-doch-stabil/>

CoNDyNet
STROMNETZE
KOLLEKTIVE NICHTLINEARE DYNAMIK KOMPLEXER STROMNETZE

VISION
Ziel: Ein dynamisches, resilientes Stromnetz
Eigenschaften: Robustheit, Selbstheilung, Resilienz, Flexibilität, Skalierbarkeit, Transparenz, Interoperabilität, Nachhaltigkeit
Methoden: Hochleistungs-Simulationen, Systemanalyse, Modellierung, Datenanalyse, Optimierung

PARTNER & ARBEITSPLAN
Fraunhofer, Jülich, etc.

CA. 50 PUBLIKATIONEN (CA. HALFT GEMEINSAM!)
Publikation von: Stromnetze, Physik, Ökonomie, und/oder Info. Science/Technik

WICHTIGE ERKENNTNISSE BIS JETZT
• Neue Leistungen können Netz stabilisieren (Eigen-Feedback)
• Bei Platzierung neuer Leistungsbänder
• Stabile Resilienz für Redundanz (Kaskadenfall)
• Globale Resilienz für dynamische Stabilität
• Problematische Situation von Störgeräten (Batteriespeicherung, Konventioneller)
• Systemische Kuratierung
• Dezentrale Regelung kann schnelle Signalgebung essentiell für Stabilität
• Analyse von Übergangszuständen: Kosten und Risiko minimieren (ca. 50% des Verlustes) (z.B. durch die Kosten der Konventioneller)

Abb. 4 CoNDyNet-Poster

Statuskonferenz „Stromnetze“, Berlin, 23.09.2016:

Beim Statusseminar ‚Zukunftsfähige Stromnetze‘ im September in Berlin konnten wir das Projekt den anderen Förderprojekten vorstellen (Abb. 4) und uns mit ihnen über neue Forschungsergebnisse austauschen. Hier hob sich das Projekt insbesondere durch seine sehr hohe Zahl an wissenschaftlichen Publikationen (ca. 50 im Verbundprojekt bis Ende 2016) positiv hervor.

Lange Nacht der Wissenschaften 2017 in Potsdam

Im Rahmen der LNdW 2017 im Wissenschaftspark „Albert Einstein“ haben wir der interessierten Öffentlichkeit an Hand obiger Simulation die Forschung im Verbundprojekt CoNDyNet vorgestellt.

Anwenderkonferenz CoNDyNet 12.-14. Juni 2017 in Potsdam:



Abb. 5 Abschlussfoto

erfolgreich präsentiert und mit ihnen diskutiert. Es nahmen etwa 70 Vertreter*innen der genannten Gruppen teil (Abb. 5). In ausführlichen Diskussionsrunden wurden zentrale Themen und Fragen identifiziert, bei denen von Seiten der Industrie weiter hoher Bedarf an Grundlagenforschung gesehen wird und bei denen ein interdisziplinärer Ansatz, wie er in CoNDyNet verfolgt wird, sehr vielversprechend ist. Besonders diskutiert wurde das Erkennen kritischer Netzzustände bei unvollständiger Information, die genaue Analyse des Potentials der Sektorkopplung und die Integration erneuerbarer Energien in wechselrichterdominierten Netzen mit wenig Schwungmasse. Auf besonders große Resonanz stießen dabei die vorgestellten Ergebnisse zur Vorhersage der Reaktion des Gesamtsystems auf Leitungsausfälle und probabilistischen Methoden für Stabilität bei Extremereignissen, sowie die bereits fest in Forschung und Anwendung etablierte Open-Source-Software PyPSA zur techno-ökonomischen Energiesystemanalyse.

Es wurde deutlich, dass das Verbundprojekt CoNDyNet ein neues Forschungsfeld etablieren konnte und in diesem Bereich momentan international führend ist.

Auszeichnung für interaktive Simulation

Im Oktober 2017 konnten wir mit unserem Modell der interaktiven Simulation von Stromnetzdynamiken in Skandinavien bei der unter anderem von der UNESCO ausgeschriebenen *Second International Competition for Exhibition Modules for the Open Source Exhibition Mathematics of Planet Earth* (MPE) den zweiten Platz belegen⁹. Unsere Simulation (Abb. 6) wird weltweit auf Outreach-Ausstellungen der IMAGINARY gGmbH zu sehen.

Auf der von der CoNDyNet-Arbeitsgruppe am PIK organisierten Konferenz "Dynamics in Power Systems: From Science to Industry" wurden die sehr vielversprechende Ergebnisse der Forschung des CoNDyNet-Verbundes zu kollektiven Phänomenen in und Nichtlinearer Dynamik von Stromnetzen und Energiesystemen einem breiten Fachpublikum aus Wissenschaftlern und Anwendern wie 50Hertz und Siemens, aber auch KMUs, und Vertretern aus Zivilgesellschaft sehr

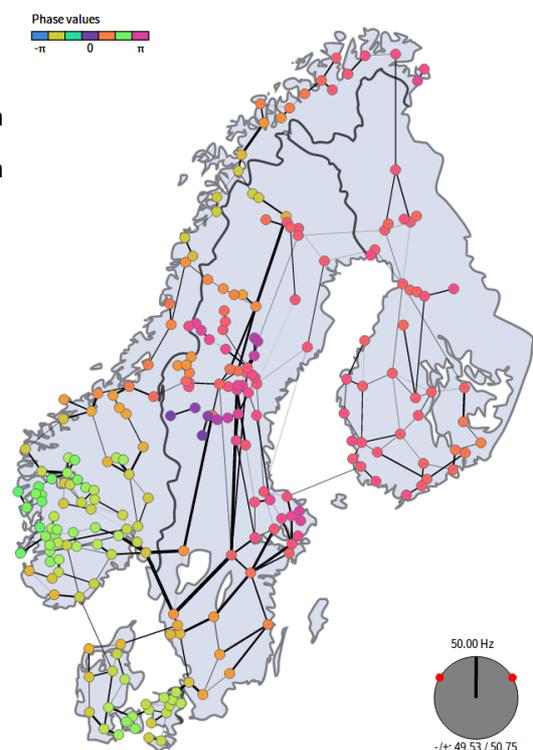


Abb. 6 Netzvisualisierung

⁹ <https://imaginary.org/news/winners-of-the-second-mathematics-of-planet-earth-competition>