

ABSCHLUSSBERICHT

NEDS - NACHHALTIGE ENERGIEVERSORGUNG NIEDERSACHSEN



FÖRDERPROGRAMM	Niedersächsisches Vorab „Wissenschaft für nachhaltige Entwicklung“
AKTENZEICHEN	VWZN3043
PROJEKTLAUFZEIT	01.04.2015 - 31.07.2019

PROJEKTLEITER/INNEN

Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel Projektkoordinator Prof. Dr. Christian Busse	Technische Universität Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – elenia Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Lehrstuhl für Nachhaltige Produktionswirtschaft
Prof. Dr. Frank Eggert	Technische Universität Braunschweig, Institut für Psychologie, Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie
Prof. Dr. Jutta Geldermann	Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Produktionsmanagement
Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann Prof. Dr. Michael Hübler	Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme Leibniz Universität Hannover, Institut für Umweltökonomik und Welthandel
Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff Prof. Dr. Michael Sonnenschein	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Energieinformatik OFFIS - Institut für Informatik, Oldenburg

AUTOREN/INNEN

Christoph Blaufuß, M. Sc. Marcel Dumeier, M. Sc.	Leibniz Universität Hannover, Institut für Elektrische Energiesysteme Universität Duisburg-Essen, Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Produktionsmanagement
Prof. Dr. Michael Hübler	Leibniz Universität Hannover, Institut für Umweltökonomik und Welthandel
Maren Kleinau, M. A.	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Lehrstuhl für Nachhaltige Produktionswirtschaft
Henning Krause, M. Sc.	Leibniz Universität Hannover, Institut für Umweltökonomik und Welthandel
Julien Minnemann, M. A.	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Lehrstuhl für Nachhaltige Produktionswirtschaft
Marvin Nebel-Wenner, M. Sc. Christian Reinhold, M. Sc.	OFFIS - Institut für Informatik, Oldenburg Technische Universität Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – elenia
Jan Sören Schwarz, M. Sc. Julia Seidel, M. Sc.	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Energieinformatik Technische Universität Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – elenia
Farina Wille, M. Sc.	Technische Universität Braunschweig, Institut für Psychologie, Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie
Tobias Witt, M. Sc.	Georg-August-Universität Göttingen, Professur für Produktion und Logistik

1 ZUSAMMENFASSUNG

In dem Forschungsprojekt *NEDS – Nachhaltige Energieversorgung Niedersachsen* wurden denkbare Transitionspfade hin zu einer auf erneuerbaren Energien basierenden Stromversorgung in Niedersachsen bis 2050 entwickelt und auf ihre Nachhaltigkeit und Umsetzbarkeit untersucht. Das Projekt ist in acht Teilprojekte mit unterschiedlichen fachlichen Schwerpunkten gegliedert, doch auch die gemeinsame Entwicklung von Methodik und Modellen nimmt einen wichtigen Teil im Projekt ein. In öffentlichen Symposien wurden Nachhaltigkeitskriterien diskutiert, Zwischenergebnisse analysiert und Endergebnisse vorgestellt. Im Projekt wurde eine umfassende Methodik zur integrierten Entwicklung und Bewertung von Energieszenarien erarbeitet und auf Niedersachsen angewendet (siehe Abbildung 1). Definierte Systemzustände für die Transitionsjahre wurden simuliert und anschließend mithilfe einer multikriteriellen Bewertungsmethode verglichen. Eine Besonderheit der entwickelten Methodik sowie ihrer Umsetzung im Projekt NEDS besteht darin, Modelle unterschiedlicher Fachdisziplinen (Energietechnik, Psychologie, Betriebswirtschaftslehre, Volkswirtschaftslehre und Informatik) in einem modularen Systemmodell zusammenzuführen und zeitabhängige Interaktionen der Einzelmodelle abzubilden.

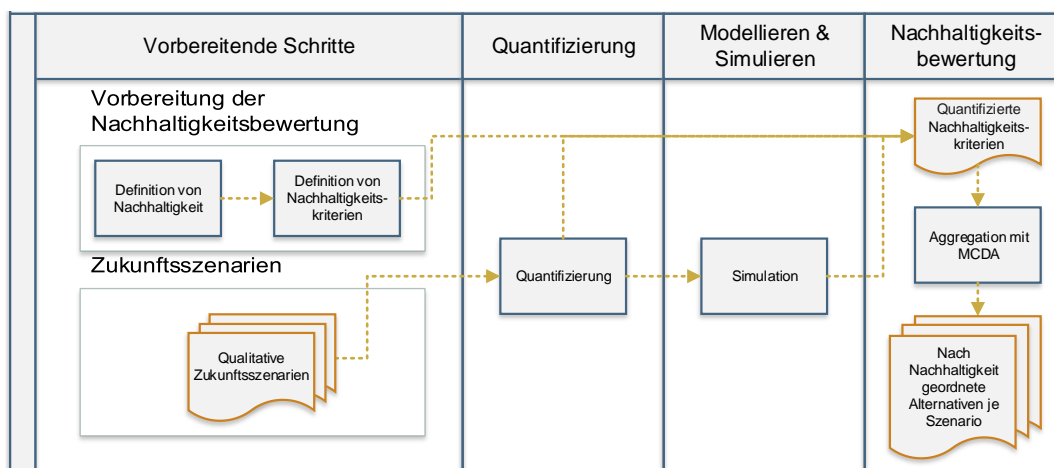


Abbildung 1: Überblick über den Prozess zur integrierten Entwicklung und Bewertung von Energieszenarien

Als Grundgerüst wurden fünf Zukunftsszenarien für das Zieljahr 2050 entwickelt. Zudem wurden drei Alternativen innerhalb eines der Zukunftsszenarien erstellt, um Entscheidungsoptionen abzubilden. Aus den qualitativen Zukunftsszenarien und Alternativen wurden quantitative Annahmen für die Simulation und Bewertung entwickelt. Diese Annahmen wurden zur Parametrisierung des Systemmodells verwendet. Die Ergebnisse der anschließenden Simulationen bildeten die Grundlage für die abschließende Systembewertung. Jeder Systemzustand konnte so mithilfe einer multikriteriellen Bewertungsmethode anhand von Nachhaltigkeitskriterien verglichen werden.

Alle hier in Kurzform dargestellten Ergebnisse werden im Rahmen der EFZN-Schriftenreihe veröffentlicht und ausführlich beschrieben und diskutiert (Erscheinungsdatum: voraussichtlich 2019).

2 WISSENSCHAFTLICHE ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse der einzelnen Teilprojekte (TP) 1-8 kurz dargestellt. Abbildung 2 zeigt das Zusammenwirken der verschiedenen Modelle innerhalb des Simulationsrahmens sowie die Verknüpfung mit der vorgelagerten Szenarientwicklung und der nachgelagerten Nachhaltigkeitsbewertung.

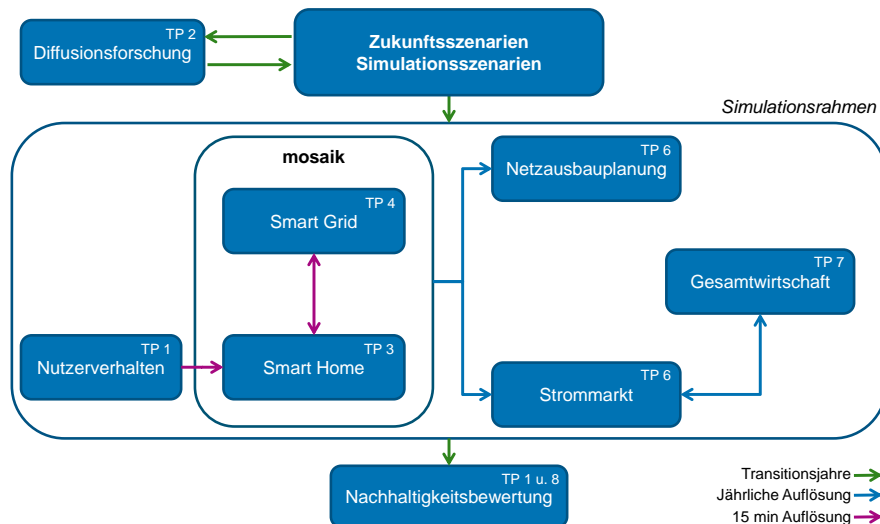


Abbildung 2: Übersicht der Schnittstellen zwischen den Teilprojekten

Im TP 1 *Bewertungsdimensionen und Verhaltensadaption im Rahmen der Entwicklung eines nachhaltigen Energieversorgungssystems* wurden Nachhaltigkeitskriterien und Stromnutzungsverhalten sowie dessen Anpassungspotentiale analysiert. Mit diesen Analysen wird ein theoretischer und methodischer Beitrag zur Bestimmung relevanter Bewertungsdimensionen von Nachhaltigkeit geleistet. Weiterhin wurde ein verhaltenswissenschaftliches Modell nutzerbezogener Flexibilität in Haushalten auf Basis restringierender Kontextfaktoren und Verhaltensanpassungskosten entworfen.

Im Zuge eines öffentlichen Auftaktsymposiums wurde Datenmaterial von Bürger/innen (Fragebögen, Interviews) und Expert/innen (Vorträge, Focus Group Diskussion, offene Diskussion) zu Nachhaltigkeitskriterien für technische, soziale, ökologische und ökonomische Facetten von Stromversorgungssystemen erhoben und deren Gewichtung inhaltsanalytisch untersucht [1]. Es wurden 31 soziale, 12 technische, 13 ökonomische und 18 ökologische Nachhaltigkeitskriterien beschrieben und für die multikriterielle Bewertung (Schnittstelle zu TP 8) in der Anzahl reduziert. Für die Analyse der Gewichtung wurden zwei Maße verwendet. Das eine erfasst die Präferenzordnung auf Basis inhaltlich-expliziter verbaler Äußerungen (inhaltliche Zusammenfassungen der kodierten Textsegmente), das andere die Präferenzordnung auf Basis des Redeaufwands für die jeweiligen Nachhaltigkeitsfacetten (Anzahl der kodierten Textsegmente sowie prozentualer Wortanteil an Gesamtwortzahl). Die implizite Präferenzordnung spiegelt den Redeaufwand und die damit assoziierten Verhaltenskosten wider. In inhaltlich-expliziten Äußerungen der Expert/innen wie auch der Bürger/innen wird die ökologische Facette als nicht zu verletzende Randbedingung gesetzt. Die Analyse des impliziten Maßes ergibt eine deutliche Dominanz der sozialen Facette. Als wesentliches Ergebnis ist somit eine Diskrepanz zwischen inhaltlich-explizitem und implizitem Maß festzustellen. Hieraus ergibt sich ein wesentlicher Diskussionspunkt hinsichtlich der Gewichtungsmethoden von Nachhaltigkeitsfacetten oder -kriterien auch in anderen Anwendungen von Entscheidungsunterstützungsmethoden: Aus theoretischer Sicht ist es nicht nur zentral, wer als Entscheidungsträger/in für die Erfassung von Präferenzen herangezogen wird, sondern auch, ob inhaltlich-explizites Verhalten oder implizite Verhaltenskosten zugrunde gelegt werden.

Steigende Anteile an erneuerbaren Energien stellen Herausforderungen für ein nachhaltiges Stromversorgungssystem dar, da diese zu Diskrepanzen zwischen Stromerzeugung und -verbrauch führen können und einen Anpassungsbedarf erzeugen. Um den Aufwand der Anpassung abwägen zu können, ist es hilfreich, das Verhalten von Individuen so abzubilden, dass sich die Möglichkeit einer verbesserten und empirisch gestützten Lastprognose auf Gebäudeebene ergibt (Schnittstelle zu TP 3) sowie die Möglichkeit einer Analyse von Lastverschiebungspotentialen auf Gebäude- und Smart Grid-Ebene (Schnittstellen zu TP 3 und TP 4). Faktoren, welche das Potential für Lastverschiebungen auf Verhaltensebene von Personen in Privathaushalten beeinflussen, wurden anhand einer empirischen, theoretisch-analytischen Untersuchung der letzten Zeitverwendungsstudie in Deutschland 2012/2013 abgeleitet [2]. Auf Basis einer Clusteranalyse wurden Verhaltensprofile erstellt und in die Simulation des Smart Home in TP 3 integriert. Als Indikatoren für wesentliche restringierende Kontextfaktoren für Wochentage wurden berufliche sowie schulische Aktivitäten und Schlafen identifiziert und für Wochenendtage berufliche und soziale Aktivitäten, Hobbies, Fernsehen und Schlafen. Interventionen mit dem Ziel, den Zeitpunkt von Stromnutzungsverhaltensweisen zu beeinflussen, sollten demnach auch die Regularitäten der Kontextfaktoren adressieren. Sie gehen somit über häufig verwendete intentions- und soziodemographiebasierte Modelle hinaus (z. B. [3], [4]). Durch einen Ansatz, der die Kontextfaktoren in den Blick nimmt, kann die Variabilität in der Verteilung von Stromnutzungsverhaltensweisen erhöht und das Problem der Diskrepanz zwischen Erzeugung und Verbrauch verringert werden. Für das nutzerbezogene Flexibilitätsmodell wurden die Verhaltensanpassungskosten spezifisch für einstündige Verschiebungen von präferierten Nutzungszeitpunkten über den Tagesverlauf von sieben im Smart Home simulierten Gerätetypen empirisch in einer Online-Erhebung (Anzahl $N = 107$) erfasst. Die Ergebnisse ließen sich modellhaft beschreiben und in die Simulation von TP 3 und 4 integrieren. Darüber hinaus fließen die Verhaltensanpassungskosten als ein soziales Bewertungskriterium in die multikriterielle Bewertung ein.

Das TP 2 *Transformation von Energiesystemen als soziale Diffusion* beschäftigte sich mit der Verbreitung von Innovationen im Rahmen der niedersächsischen Energiewende, möglichen Hemmnissen und befördernden Faktoren. Als theoretische Fundierung der Untersuchung dient Rogers' „Diffusion of Innovations“ [5], in der vier zentrale Elemente der Diffusion erklärt werden: die Innovation, Kommunikationskanäle, Zeit und das soziale System.

Aus den erstellten Zukunftsszenarien (vgl. dazu TP 5) und einer Literaturanalyse konnten 36 Innovationen identifiziert werden, die für ein zukünftiges, niedersächsisches Energiesystem relevant erscheinen. Aufgrund der exemplarischen Vertiefung des Szenarios „Konkurrenzfähige konventionelle Kraftwerke und nicht genutztes Potenzial Erneuerbarer“ und spezifischer Anforderungen an eine Diffusionsuntersuchung schloss sich eine Vielzahl an Innovationen für eine detaillierte Betrachtung aus. Im Ergebnis wurden mit Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen mit Speicher, Elektromobilität, Smart Metern sowie flexiblen Stromtarifen fünf Innovationen charakterisiert, die für das Projekt relevant sind. Im nächsten Schritt wurden durch die Auswertung aktueller Studien sowie durch einen Analyseprozess, in dem weitere Akteure aus Experteninterviews abgeleitet wurden, relevante Adopter und Change Agents der einzelnen Innovationen identifiziert. Diese Akteure wurden in folgende Gruppierungen strukturiert: private Haushalte, Kommunen, Unternehmen der Wohnungswirtschaft, Energieversorger, Verteilungsnetzbetreiber und sonstige Unternehmen. Je nach Innovation nahmen die Akteure der unterschiedlichen Gruppierungen verschiedene Rollen ein. Beispielsweise können bei Photovoltaikanlagen mit Batteriespeichern private Haushalte als Adopter genannt werden und Energieversorger als Change Agents. Kommunen, Unternehmen der Wohnungswirtschaft sowie sonstige Unternehmen können sowohl als Adopter, Change Agent oder in einer Doppelrolle fungieren. Aufbauend darauf wurden die Elemente nach [5] mit Hilfe empirischer Daten in Form von insgesamt 46 leitfadengestützten (Experten-)Interviews (u.a. [6]), davon 20 Interviews mit Adoptern und 26 mit Change Agents der ausgewählten Innovationen, untersucht. Die Durchführung und Auswertung dieser Interviews erfolgte fokussiert auf den individuellen Adoptionsprozess auf

Seiten privater Haushalte und die Rolle der Change Agents auf Seiten der Unternehmen, um unterschiedliche Sichtweisen abzudecken.

Im Ergebnis sind entscheidende qualitative Erkenntnisse bezüglich der Diffusion der ausgewählten Innovationen in Diffusionsstudien zusammengeführt worden, die insbesondere Aufschluss über die diffusionsrelevanten Attribute der jeweiligen Innovation, zentrale Akteure des sozialen Systems sowie die vergangene und erwartete künftige Entwicklung der Verbreitung geben. Diese empirische Fundierung ergänzt die Simulation um wertvolle qualitative Einordnungen ausgewählter Komponenten. Die Ergebnisse der Diffusionsstudien der Innovationen Elektromobilität, Photovoltaik mit Speicher, Wärmepumpen und Smart Meter konnten genutzt werden, um in Abstimmung mit TP 3 und TP 4 die Transitionspfade dieser Innovationen in der Simulation auszugestalten. Die Ergebnisse der flexiblen Stromtarife grenzen thematisch an die Schnittstelle zwischen TP 1 und 4 an.

Im Rahmen der Untersuchung wurde deutlich, dass in Bezug auf einige Teilaspekte weiterer, dringender Forschungsbedarf besteht: Aus der Gruppe der Change Agents wurde mit den Stadtwerken ein zentraler Akteur identifiziert, dessen Rolle innerhalb der Energiewende bislang kaum erforscht wurde. Im Zuge von Geschäftsmodellinnovationen verfügen Stadtwerke jedoch über Handlungsspielräume zur Gestaltung der Energiewende. Ein Verständnis über die Handlungsspielräume und wie diese durch Geschäftsmodellinnovationen genutzt werden können, würde die Transition zu einem nachhaltigen Energiesystem stärken. In Bezug auf die Innovationseigenschaften wurde im Rahmen der Untersuchungen deutlich, dass gerade in technologischen Produktbereichen die Interdependenzen einzelner Innovationen deren Adoption und Diffusion beeinflussen können. Inwiefern diese Beeinflussung stattfindet und wie weitreichend sie ist, bedarf weiterer Erforschung interdependenter Produkte.

In TP 3 *Smart Home im Smart Grid* wurde die rechnergestützte Nachbildung des Endverbrauchers mit ihren elektrischen und thermischen Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen im Niederspannungsnetz untersucht. Dazu wurde die Simulationsumgebung eSE (elenia Simulation Environment) [7] entwickelt, in der die Komponenten energetisch modelliert wurden und die Möglichkeit besteht, sie dynamisch miteinander zu koppeln. In Zusammenarbeit mit TP 1 wurde das Verhalten von Nutzern detailliert nachgebildet, um das Flexibilitätspotential von nutzerbezogenen Gerätetypen (z. B. Waschmaschine) zu untersuchen [8]. Die untersuchten, ländlichen und städtischen Netzgebiete, welche sich mit ihren statistischen Verteilungen auf Referenzorte in Niedersachsen beziehen, und deren Durchdringungen von Komponenten wurden gemeinsam im Projektkonsortium erarbeitet und insbesondere mit der Diffusionsforschung aus TP 2 verglichen. Mit Hilfe des Co-Simulation-Frameworks mosaik¹ wurden schließlich die Modelle aus TP 3 und TP 4 miteinander verknüpft, damit die Teilnahme von Endverbrauchern mit ihren Anlagen an einer gemeinsamen Verbundsteuerung untersucht werden konnte. Die Ergebnisse der gemeinsamen Simulation mit mosaik gehen als Eingangswerte in die Netzausbauplanung von TP 6 mit ein.

Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeiten aus TP 3 sind:

- Zur Nachbildung von vernetzten thermischen und elektrischen Komponenten in Wohngebäuden wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, welche eine Wiederverwertbarkeit garantiert.
- Es wurden energetische Modelle für thermische und elektrische Komponenten und, in Zusammenarbeit mit TP 1, ein Nutzermodell entwickelt und in die Simulationsumgebung integriert.
- In Zusammenarbeit mit TP 4 und TP 5 wurde die Nachbildung des Endverbrauchers mit seinen Komponenten in die Co-Simulationsplattform mosaik integriert, um die Teilnahme an einer Verbundsteuerung

¹ <https://mosaik.offis.de>

rung mit einem multikriteriellen Optimierungsalgorithmus zu untersuchen. Die Weiterverwendbarkeit ist über die Projektlaufzeit und die Projektfragestellungen hin möglich.

- Dezentrale Hausspeichersysteme können bei einer geeigneten Parametrierung eine Leistungsflexibilität zum Ausgleich von Erzeugungs- und Verbrauchsleistungen innerhalb des Gebäudes sowie innerhalb des Netzverbundes (siehe Ergebnisse TP 4) anbieten. Sie reduzieren unter der Restriktion der lokalen Optimierungsstrategie auftretende Netzbelastungen, um die Verkehrs- und Wärmewende zu unterstützen.
- Eine hohe Verbreitung von Elektrofahrzeugen mit der Möglichkeit, zu Hause zu laden, bewirkt eine hohe Netzbelastung in der Niederspannungsebene, welche durch die Verbundsteuerung nur bedingt reduziert werden kann (siehe Ergebnisse TP 4). Ein zwischenzeitliches Laden an öffentlichen Ladesäulen reduziert die nachzuladende Speicherenergie und ermöglicht einen breiten Zeitbereich der Verschiebung.
- Das Angebot von Flexibilität aus nutzerbezogenen Geräten (z.B. Waschmaschine, Geschirrspülmaschine) steht der Verbundsteuerung nur in begrenztem Umfang zu Verfügung aufgrund einer Vielzahl entscheidender Restriktionen (Anwesenheit, Nutzungsdauer und Wachphase der Nutzer/innen). Finanzielle Vorteile beim Angebot von Flexibilität aus diesen Gerätetypen für den Anlagenbetreiber ergeben sich ebenfalls nicht.

Das TP 4 *Szenarienbasierte Analyse und Optimierung von nachhaltigen Smart Grids* beschäftigt sich mit der Entwicklung und Analyse einer Betriebsstrategie für eine multikriterielle Verbundoptimierung von flexiblen Lasten und Speichern im Niederspannungsnetz. Hierzu wurde ein Multi-Agenten-System (MAS) entwickelt, welches den Prozess der vollständig verteilten Optimierung von flexiblen Lasten steuert. Innerhalb des MAS verwaltet je ein Agent die Flexibilität eines Haushalts. Gemeinsam tauschen diese an der Verbundsteuerung beteiligten Agenten Nachrichten aus und optimieren so ihren aggregierten Lastgang. Hierbei kommt die vollständig verteilte Heuristik COHDA (*Combinatorial Optimization Heuristic for Distributed Agents*) [9] zur Anwendung. Die dafür benötigte Kommunikationsinfrastruktur besteht aus einem Breitbandinternetzugang (DSL) oder einer Internetanbindung mittels LTE (Long Term Evolution) Standard [10]. Innerhalb der Verbundoptimierung wurden folgende, teils in Konflikt stehende Optimierungsziele berücksichtigt:

- *Eigenverbrauchsoptimierung*: Innerhalb des Verbundes erzeugte Energie soll lokal genutzt und möglichst nicht zurück in das Stromnetz gespeist werden.
- *Netzdienlichkeit*: Lastspitzen sollen vermieden werden, um Engpässe im Netz zu verhindern.
- *Marktdienlichkeit*: Ziel ist hierbei die Ausnutzung der Börsenstrompreisvolatilität. Da es bei sehr hoher Stromproduktion aus regenerativen Quellen oft zu geringen Preisen auf dem Strommarkt kommt, führt dieses Ziel auch zu einer Optimierung der Nutzung regenerativer Kraftwerkskapazitäten.
- *Verhaltensanpassung*: Die innerhalb der Arbeiten aus TP 1 ermittelten, für die Nutzer/innen anfallenden Kosten zur Verschiebung der Lasten sollen minimiert werden.

Als Flexibilitäten stehen einerseits die in TP 3 bestimmten nutzerbezogenen Flexibilitäten zur Verfügung. Weiterhin wurden Flexibilitätsprofile von Hausspeichern auf Basis der in TP 3 erstellten Speichermodelle generiert, um das Lastverschiebungspotential von Batteriespeichern in die Verbundoptimierung zu integrieren. Auf Basis der im Projekt entwickelten Zukunftsszenarien und unter Nutzung der Arbeiten aus TP 5 wurden umfangreiche Simulationen der Verbundoptimierung durchgeführt und ausgewertet.

Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeiten aus TP 4 sind:

- Eine Optimierung der Lastgänge im Verbund hat das Potential, die Netzbelastung signifikant zu reduzieren und gleichzeitig Lasten in Zeiten zu verschieben, in denen Strompreise gering sind. So kann beispielsweise die Maximallast innerhalb des Verbundes um bis zu 40 % reduziert werden.
- Ein wichtiger Parameter besteht in der Größe des Verbundes – je mehr Haushalte an der Verbundoptimierung teilnehmen, desto stärker ist der positive Effekt der Steuerung.
- Unter Berücksichtigung der Annahmen bzgl. einer vermehrten Nutzung von Elektroautos ist insbesondere die Steuerung der entsprechenden Ladevorgänge wirkungsvoll, da sie in einem solchen Szenario für einen Großteil der Last verantwortlich sind.
- Die Verbundsteuerung ist weniger effektiv, Rückspeisepeaks zu reduzieren, die durch hohe Einspeisungen der im Netz befindlichen PV-Anlagen entstehen, da die Haushalte in der Regel nicht genügend (kostengünstige) Flexibilität haben, um Lasten in die entsprechenden Zeiträume zu verschieben.
- Durch die flexiblen Einsatzmöglichkeiten haben Hausspeichersysteme das Potential, das Optimierungsergebnis zu verbessern. Bei einer für den Haushalt eigenverbrauchsoptimierten Fahrweise eines Hausspeichers bleibt jedoch in der Regel nicht genügend Flexibilität, um die Verbundoptimierung zusätzlich zu unterstützen.

Die Aufgabe des TP 5 war die Bereitstellung einer *Simulationsplattform zur Nachhaltigkeitsbewertung von Smart Grid Szenarien*. Als Grundlage für konkrete Simulationen war zunächst die gemeinsame Entwicklung von Zukunftsszenarien nötig. Dazu wurde die Szenario-Technik nach Gausemeier [11] angewendet und der Prozess im Gesamtprojekt entsprechend angeleitet [12]. Durch die Anwendung der Szenario-Technik lässt sich der Prozess der Erstellung von Zukunftsszenarien transparent darstellen.

Für die Verwendung der qualitativen Zukunftsszenarien als Grundlage von quantitativen Simulationen wurde gemeinsam ein allgemeiner Prozess entwickelt und mit TP 4 und TP 8 beschrieben und veröffentlicht [13][14]. Dieser *Sustainability Evaluation Process (SEP)* beschreibt das Vorgehen von der Entwicklung der Zukunftsszenarien und Nachhaltigkeitskriterien über die Quantifizierung, Simulation und abschließende multikriterielle Bewertung der Zukunftsszenarien und Simulationsergebnisse.

Außerdem wurden Prozesse zur Integration der Informationen aus dem SEP in die konkrete Simulationsdurchführung entwickelt. Dazu werden Semantic Web Technologien verwendet, um den SEP mit Hilfe eines Informationsmodells abzubilden und Simulationsexperten bei der Konfiguration von konkreten Simulationsszenarien zu unterstützen [15]. Dabei werden im Informationsmodell die zu betrachtenden Domänen und deren Objekte gesammelt und Verbindungen zu Simulationsmodellen und der Bewertung modelliert. Anhand dieser Modellierung und eines Co-Simulationskomponentenkatalogs kann der/die Anwender/in bei der Auswahl von passenden Simulationsmodellen und Bewertungsfunktionen unterstützt werden und es wurde somit ein erster Schritt hin zu einer Automatisierung dieses Prozesses erreicht.

Für die Simulation in NEDS wurden die Simulationsmodelle aus den TP 3 und 4 mit dem Co-Simulation-Framework mosaik miteinander verbunden. Zur Optimierung der Laufzeit wurde die bereits vorhandene mosaik-Matlab-Anbindung um Funktionen zur Parallelisierung der Modellausführung erweitert. Für den Austausch von Daten zwischen den weiteren Modellen, den Zukunftsszenarien und der Bewertung wurde eine Szenario-Datenbank implementiert, deren Schema automatisch anhand der Daten aus dem Informationsmodell erstellt wird.

Das TP 6 *Nachhaltige Netzausbauplanung für eine regenerative Stromversorgung* untersucht den Ausbau der nachhaltigen Elektroenergieversorgung in Niedersachsen unter der Berücksichtigung einer voranschreitenden

erneuerbaren, dezentralen Energieerzeugung und eines sich im Wandel befindlichen elektrischen Energiebedarfs.

Neben der Unterstützung des Aufbaus einer wissenschaftlichen Methodik zur Bewertung der Nachhaltigkeit und der Entwicklung von Elektroenergieszenarien für Niedersachsen wurden Modelle zur Ermittlung des zukünftigen Netzausbaubedarfes von Verteilnetzen und des sich in Niedersachsen befindlichen Höchstspannungsnetzes entwickelt. Das Modell für die Übertragungsebene setzt sich aus einer integrierten Netz- und Strommarktsimulation zusammen [16]. Das Markt- und Speichermodell wurde diesbezüglich für eine überwiegend regenerative, volatile Energieeinspeisung angepasst [17] und liefert, basierend auf zeitreihengestützten Last- und Einspeisedaten, die Systemzustände für das Zieljahr 2050 und die Stützjahre 2020, 2030 und 2040. Die vom Modell erzeugten Ergebnisse ermöglichen Aussagen über den benötigten Netzausbau, den Wirkungsgrad, den Kraftwerkeinsatzplan und den Energieexport des niedersächsischen Übertragungsnetzes in Abhängigkeit der Größe und Lokation von Energiespeichern und dezentralen Erzeugungsanlagen (z. B. onshore und offshore Windparks).

Die Netzausbauplanung für die Verteilungsebene erfolgt kaskadiert mit einem hybriden Ansatz aus Heuristik und linearer Optimierung. Die Zielzustände der Verteilnetze des Jahres 2050 werden durch die Methodik der Grünen-Wiese-Planung, d. h. ohne Berücksichtigung der vorhandenen Netzinfrastruktur, generiert. Die Ausbaupfade vom Startnetz 2015 über die Stützjahre zu den jeweiligen Zielnetzen werden durch die Berücksichtigung der vorhandenen Netzinfrastruktur (Graue-Wiese-Planung) gewährleistet. Die Netzausbauplanung lässt sich in drei Aspekte unterscheiden: Strukturoptimierung, optimierte Betriebsmittelauslegung und optimierte Betriebsführung der dezentralen Erzeugungsanlagen. Der Netzausbau bzw. die Netzverstärkung kann beispielsweise durch eine induktive Fahrweise oder Fahrweise mit Spitzenkappung der dezentralen Erzeugungsanlagen vermieden werden. Die Struktur des Verteilungsnetzes wird mittels einer kombinierten Heuristik geplant und liefert Aussagen über einen anzustrebenden Trassenverlauf, die Verortung und Anzahl von Umspannstationen sowie die Nutzung von Randnetzen im Kontext einer strukturellen (n-1)-Sicherheit. Die Auslegung der Betriebsmittel und die verwendete Betriebsführung der Erzeugungsanlagen erfolgen über den Ansatz der linearen Optimierung, welche die minimalen Ausbaukosten als Zielfunktion unter Einhaltung der Netzrestriktionen verwendet. Die einzelnen Optimierungsmethoden sind miteinander verzahnt und liefern als Ergebnis einen zukünftigen Netzentwurf mit den geringsten Netzkosten sowie deren Ausbaupfade. Als auslegungsrelevante Netzzustände werden die in den Energieszenarien aus TP 3, TP 4 und TP 5 erarbeiteten Prognosen für dezentrale Einspeisungen und die Lastentwicklung verwendet. Das Modell erlaubt die Berücksichtigung von zukünftigen Anforderungen an die Systemsicherheit und ggf. Systemdienstleistungen.

Das TP 7 *Gesamtwirtschaftliche Nachhaltigkeitsbewertung* untersucht die Nachhaltigkeit der niedersächsischen Energiepolitik im Kontext der deutschen Energiewende und der europäischen Klimapolitik aus der volkswirtschaftlichen Perspektive.

Im ersten Schritt wurde ein Beitrag zur wissenschaftlichen Methodik geleistet, indem ein innovatives, statisches Computable General Equilibrium (CGE) Modell entwickelt wurde, welches ein umfassendes Modell des internationalen Handels [18] mit einem multiregionalen und multisektoralen Modell von Produktion und Konsum [19] verbindet. Das Modell weist eine neuartige Kombination von Charakteristika auf, die auf das Projekt zugeschnitten sind. Es berücksichtigt die Effekte von nicht-tarifären Handelshemmnissen im Stromerzeugungssektor, von globaler wirtschaftlicher Integration, sowie Klimapolitiken der Ebenen EU, Deutschland und Niedersachsen. Die benötigten Daten wurden im Rahmen des Projekts bis auf die Niedersachsen- und die Energiequellenebene disaggregiert. Während eine Dekompositionsanalyse die Ursachen für Veränderungen von CO₂-Emissionen offenlegte, evaluierte eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse mit Risiko-Simulationen die Robustheit der Ergebnisse.

Als erste innovative Anwendung wurden die Interaktionseffekte zwischen Handels- und Klimapolitik untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Niedersachsen unter dem EU-Emissionshandel fast dreimal so viel CO₂ einsparen kann (26,5 % im Vergleich zum Referenzszenario ohne EU-Emissionshandel) wie das übrige Deutschland [20]. Dies liegt vor allem an den relativ niedrigen Emissionsvermeidungskosten im Elektrizitätssektor durch die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien (Windkraft). Die internationale Förderung erneuerbarer Energien verringert diesen komparativen Vorteil des niedersächsischen Elektrizitätssektors jedoch. Der Abbau von Handelshemmnissen in Kombination mit Klimapolitik führt zu stärkeren CO₂-Reduktionen in Niedersachsen als die Klimapolitik alleine (29,7 % im Vergleich zum Referenzszenario). Überdies führt diese Kombination von Politikmaßnahmen zu größeren Wohlfahrtsgewinnen in Niedersachsen (0,4 % des Konsums) als im übrigen Deutschland (0,18 %). Diese Forschungsarbeit wurde in dem allgemeinen, ökonomischen, europäischen Top-Journal *European Economic Review* veröffentlicht [20].

Im zweiten Schritt wurde das CGE-Modell zu einem dynamischen Modell weiterentwickelt, welches den Zeitraum bis zum Jahr 2050 abbildet [21]. So konnte das Modell auf die im Projektkonsortium entwickelten Zukunftsszenarien für den nordwestdeutschen² Energiesektor kalibriert und der Einfluss von nordwestdeutschen Politikmaßnahmen innerhalb dieser Szenarien evaluiert werden. Innerhalb des Projektkonsortiums wurden hierbei Daten zum Elektrizitätsmix und CO₂-Preise zwischen TP 6 und TP 7 ausgetauscht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die CO₂-Reduktionsziele der EU zu relativ geringen volkswirtschaftlichen Kosten (0,03 % Konsumverlust im Vergleich zum Basisjahr 2011) in Nordwestdeutschland umgesetzt werden können, solange die Energiewende mit einem starken Ausbau erneuerbarer Energien nicht scheitert. In jedem Fall steigen die nordwestdeutschen Kosten der CO₂-Reduktion zum Jahr 2050 hin deutlich an (mithin auf 1,4 %). Generell verursacht die CO₂-Reduktion außerhalb der vom EU-Emissionshandel erfassten Sektoren deutlich höhere Kosten als innerhalb. Ein einheitlicher CO₂-Preis für alle Sektoren würde diese Kosten reduzieren. Die Ergebnisse der Szenariosimulationen wurden in die multikriterielle Gesamtprojektanalyse eingebracht. Dieser zweite Schritt der Forschungsarbeit ist bisher als Diskussionspapier der Universität Hannover erschienen [21].

Das TP 8 *Multikriterielle Bewertung von Transitionspfaden* integriert die Ergebnisse der Modellierung und Simulation, um die Nachhaltigkeit der erarbeiteten Transitionspfade der niedersächsischen Energiewende zu untersuchen. Die Forschungsergebnisse wurden in drei Schritten erarbeitet.

Im ersten Schritt wurde ein *Klassifikationsschema für Energieszenarien* entwickelt, welches aus vier Teilbereichen besteht [23]: (1) Eigenschaften der Szenarien, (2) Eigenschaften der Energiesystemmodelle, (3) wissenschaftliche Praxis und (4) Einbindung von Stakeholdern. In Bezug auf das Projekt NEDS können mit dem Klassifikationsschema relevante Vorarbeiten, z. B. die Identifikation und Klassifikation anderer Energieszenarien für die niedersächsische Energiewende (siehe z. B. [22]), vorgenommen werden.

Im zweiten Schritt wurde ein neuer *Ansatz zur integrierten Entwicklung und Bewertung von Energieszenarien* in Zusammenarbeit mit TP 4 und 5 entwickelt [13][14]. Zur besseren theoretischen Fundierung des Ansatzes wurde dieser in TP 8 weiterentwickelt, um die Anknüpfungspunkte zu den Standardmethoden der Szenariotechnik, Energiesystemanalyse und Mehrzielentscheidungsunterstützung aufzuzeigen [24]. Ein Vorteil der Weiterentwicklung ist die konsistente Verwendung der Terminologie zu Szenarien, Alternativen und externer Unsicherheit.

² Nordwestdeutschland umfasst im NEDS-Projekt die Bundesländer Niedersachsen, Hamburg und Bremen. Sie wurden in Übereinstimmung mit den Analysen des „Runden Tisches“ [22] gemeinsam analysiert.

Im dritten Schritt wurde die etablierte, multikriterielle Entscheidungsunterstützungsmethode *Preference ranking organization method for enrichment evaluation* (PROMETHEE) weiterentwickelt, sodass eine Betrachtung mehrerer Perioden und damit eine Bewertung von Transitionspfaden des Energieversorgungssystems möglich ist (so genanntes *MP-PROMETHEE*) [25]. Die Methode wurde zunächst an einem vereinfachten Beispiel der Planung eines Bioenergiedorfs erprobt [25], und daraufhin zur Bewertung von Transitionspfaden für das niedersächsische Stromversorgungssystem angewendet. Dazu wurden drei Alternativen für das Jahr 2050 definiert: (1) lokale Energieversorgung, (2) konzentrierte Energieversorgung mit Großanlagen und (3) ein hybrides Energieversorgungssystem. Die zur Bewertung dieser Systeme erforderlichen Daten wurden mithilfe von verschiedenen Energiesystemmodellen (der TP 1, 3, 4, 6 und 7) berechnet. Bei einer multikriteriellen Bewertung mit Gleichgewichtung der Kriterien schneidet im Zieljahr 2050 sowie in den Jahren 2030 und 2040 die konzentrierte Energieversorgung am besten und die lokale Energieversorgung am schlechtesten ab [24]. Bei einer multikriteriellen Bewertung der Transitionspfade bleibt diese Bewertung unverändert. Es zeigt sich allerdings, dass in der ersten Periode das hybride Energieversorgungssystem am besten abschneidet. Bei einer stärkeren Präferenz kurzfristiger Ziele kann dieses System vorzuziehen sein.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Mayring, *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*, 11. Auflage: Beltz Verlagsgruppe, 2010.
- [2] Statistisches Bundesamt, "Zeitverwendungserhebung: Aktivitäten in Stunden und Minuten für ausgewählte Personengruppen," 2012/2013, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 5639102139004, 2015. www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Zeitbudgeterhebung/Zeitverwendung5639102139004.pdf?__blob=publicationFile. Zuletzt geprüft am: 03.09.2015.
- [3] E. Frederiks, K. Stenner, und E. Hobman, "The Socio-Demographic and Psychological Predictors of Residential Energy Consumption: A Comprehensive Review," *Energies*, Jg. 8, H. 1, S. 573–609, 2015.
- [4] W. Abrahamse und L. Steg, "Factors Related to Household Energy Use and Intention to Reduce It: The Role of Psychological and Socio-Demographic Variables," *Human Ecology Review*, 2011, S. 30–40, 2011.
- [5] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations*, 5. Auflage. New York, London, Toronto, Sydney: Free Press, 2003.
- [6] J. Gläser und G. Laudel, *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*, 4. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag, 2010.
- [7] C. Reinhold und B. Engel, "Simulation environment for investigations of energy flows in residential districts and energy management systems," In *International ETG Congress 2017*, ETG (Hrsg.), Berlin, Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2017.
- [8] C. Reinhold, F. Wille, B. Engel, und F. Eggert, "Empirische und Synthetische Lastprognose von nutzerabhängigen Verbrauchsgeräten," In *15. Symposium Energieinnovation*, 2018.
- [9] C. Hinrichs und M. Sonnenschein, "A distributed combinatorial optimisation heuristic for the scheduling of energy resources represented by self-interested agents," *IJBIC*, Jg. 10, H. 2, S. 69, 2017.
- [10] D. Hölker, D. Brettschneider, R. Toenjes, und M. Sonnenschein, "Choosing communication technologies for distributed energy management in the smart grid," In *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe): Torino, Italy, 26-29 September 2017 : conference proceedings*, Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 1–6.
- [11] J. Gausemeier und C. Plass, *Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung: Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen*, 2. Auflage. München: Hanser, 2014.

-
- [12] M. Blank, C. Blaufuß, M. Glötzel, J. Minnemann, M. Nebel-Wenner, A. Nieße, F. Pothen, C. Reinhold, J. S. Schwarz, K. Stahlecker, F. Wille, T. Witt, F. Eggert, B. Engel, J. Geldermann, L. Hofmann, M. Hübler, S. Lehnhoff, N. Peach und M. Sonnenschein, *Whitepaper: NEDS Szenarien - Zukunftsszenarien für eine nachhaltige Energieversorgung in Niedersachsen für das Jahr 2050*. www.neds-niedersachsen.de/uploads/tx_tkpublikationen/Whitepaper-Szenarien-V1.pdf. Zuletzt geprüft am: 30.06.2019.
- [13] J. S. Schwarz, T. Witt, A. Nieße, J. Geldermann, S. Lehnhoff, und M. Sonnenschein, "Towards an Integrated Sustainability Evaluation of Energy Scenarios with Automated Information Exchange," In *Proceedings of the 6th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*, SCITEPRESS (Hrsg.): SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2017, S. 188–199.
- [14] J. S. Schwarz, T. Witt, A. Nieße, J. Geldermann, S. Lehnhoff, und M. Sonnenschein, "Towards an Integrated Development and Sustainability Evaluation of Energy Scenarios Assisted by Automated Information Exchange," In *Communications in Computer and Information Science*, vol. 921, *Smart Cities, Green Technologies, and Intelligent Transport Systems: 6th International Conference, SMARTGREENS 2017, and Third International Conference, VEHITS 2017, Porto, Portugal, April 22-24, 2017, Revised Selected Papers*, B. Donnellan, C. Klein, M. Helfert, O. Gusikhin, und A. Pascoal (Hrsg.), Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 3–26.
- [15] J. S. Schwarz und S. Lehnhoff, "Ontology-Based Development of Smart Grid Co-Simulation Scenarios," In *Proceedings of the EKAW 2018 Posters and Demonstrations Session (EKAW-PD 2018)*, Nancy, France, November 12-16, 2018, O. C. Philipp Cimiano (Hrsg.), 2018, S. 21–24.
- [16] T. Rendel, *Erweiterung und Plausibilisierung eines Modells für die integrierte Simulation des europäischen Verbundnetzes und Strommarktes*. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2015. München: Dr. Hut, 2015.
- [17] T. Wolgast, C. Blaufuß, und L. Hofmann, "Evaluation of a Transition Path to a Future Scenario of Lower Saxony's Energy Supply under Variation of Storage," In *Proceedings of the VDE/IEEE Power and Energy Student Summit 2018*, Kaiserslautern, 2018.
- [18] L. Caliendo und F. Parro, "Estimates of the Trade and Welfare Effects of NAFTA," *The Review of Economic Studies*, Jg. 82, H. 1, S. 1–44, 2015.
- [19] C. Böhringer und A. Löschel, "Promoting Renewable Energy in Europe: A Hybrid Computable General Equilibrium Approach," *The Energy Journal*, Jg. Hybrid Modeling, H. Special Issue #2, S. 135–150, https://EconPapers.repec.org/RePEc:aen:journal:2006se_jaccard-a07, 2006.
- [20] F. Pothen und M. Hübler, "The interaction of climate and trade policy," *European Economic Review*, Jg. 107, S. 1–26, 2018.
- [21] F. Pothen und M. Hübler, *A forward calibration method for new quantitative trade models*. diskussionspapiere.wiwi.uni-hannover.de/index.php?number=643.
- [22] M. Faulstich, "Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050: Gutachten," Hannover 978-3-00-052763-0, 2016. Zuletzt geprüft am: 22.04.2016.
- [23] T. Witt, K. Stahlecker, und J. Geldermann, "Morphological analysis of energy scenarios," *International Journal of Energy Sector Management*, Jg. 12, H. 4, S. 525–546, 2018.
- [24] T. Witt, M. Dumeier, und J. Geldermann, "Combining scenario planning, energy system analysis, and multi-criteria analysis to develop and evaluate energy scenarios," *Journal of Cleaner Production*, 2019, In *Begutachtung*.
- [25] T. Witt, M. Dumeier, und J. Geldermann, "Multi-criteria Evaluation of the Transition of Power Generation Systems," In *Multikriterielle Optimierung und Entscheidungsunterstützung: Tagungsband GOR Entscheidungstheorie und -praxis 2018*, K.-H. Küfer, S. Ruzika, und P. Halffmann (Hrsg.), Wiesbaden: Springer Gabler, 2019, S. 121–141.

3 SELBSTEINSCHÄTZUNG IM VERGLEICH MIT DEN URSPRÜNGLICHEN ZIELEN UND PLANUNGEN

Das Ziel des Forschungsvorhabens NEDS bestand in der Entwicklung einer Methodik zur Überprüfung von Szenarien einer zukünftigen nachhaltigen Energieversorgung für Niedersachsen sowie der Bestimmung von optimalen technologischen Umsetzungspfaden zur Erreichung dieser Zielvorgabe unter definierten Nachhaltigkeitskriterien. Die Szenarien wurden in gemeinsamer Arbeit der Teilprojekte erarbeitet und dienten als Grundlage für Simulationen. Dazu wurden Modelle entwickelt, in denen die verschiedenen Facetten der Nachhaltigkeit berücksichtigt werden können. Somit konnte die entwickelte Methodik beispielhaft auf ein Zukunftsszenario angewandt werden und somit ihre Funktion gezeigt werden.

In der Zielbeschreibung des TP 1 wurden im Wesentlichen zwei Analysebereiche formuliert. Einer bezieht sich auf die Analyse von Anforderungen, die an ein nachhaltiges Stromversorgungssystem herangetragen werden. Der zweite Analysebereich umfasst in enger Abstimmung mit TP 3 das Ziel, Veränderungen im Versorgungssystem hinsichtlich zukünftiger Lastsituationen zu beschreiben, die Anpassungen im Verhalten erfordern. Beide Zielbereiche wurden erfolgreich bearbeitet. Aufgrund der Notwendigkeit einer Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen der Gesamtmethothenentwicklung wurde ein Schwerpunkt auf die inhaltlich zusammenfassende Beschreibung von Anforderungen im Sinne von Kriterien, die ein nachhaltiges Stromversorgungssystem erfüllen sollte, gelegt. Bei den Untersuchungen zum Verbraucherverhalten zur Abbildung zukünftiger Lastsituationen konnte die Analyseebene auf das Smart Grid (TP 4) ausgeweitet werden.

Im Rahmen des TP 2 konnten zahlreiche, interessante Erkenntnisse bezüglich der Diffusions- und Adoptionsprozesse ausgewählt, für die Energiewende relevanter, Innovationen gewonnen werden. Dabei wurden unterschiedliche Perspektiven miteinbezogen, und es konnten neben wissenschaftlichen Beiträgen auch praktische Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die ursprüngliche Zielformulierung des TP 2 beinhaltete weiterhin die Untersuchung der Diffusion bestimmter Handlungsmuster beziehungsweise Verhaltensweisen der Adopter. Im Rahmen der Bearbeitung hat sich jedoch herausgestellt, dass durch die konkrete Betrachtung von Produktinnovationen ein klar abgrenzbares Untersuchungsfeld entsteht, welches eine genauere Untersuchung ermöglicht. Die Produktinnovationen wurden daher als Ausgangspunkt der weiteren Betrachtungen fokussiert. Ferner wurde im Zuge der Analyse klar, dass Handlungsempfehlungen zur Unterstützung der Diffusion einzelner Innovationen sehr stark voneinander abweichen und übergreifende Aussagen dieser Komplexität schwerlich gerecht werden können. Als unerwartete, zentrale Ergebnisse können jedoch die Interdependenzen einzelner Innovationen und die Notwendigkeit von Geschäftsmodellinnovationen bei Schlüsselakteuren der Energiewende besonders betont werden.

Abweichend von der Aufgabenbeschreibung des TP 3 wurde auf Untersuchungen mit Hilfe von Netzberechnungen verzichtet. Die zusätzlichen, inhaltlichen Aussagen durch Netzberechnungen hätten für das Projektziel keine signifikante Stellung eingenommen. Daher wurde der inhaltliche Schwerpunkt von TP 3 in Absprache mit dem Projektkonsortium auf die Kopplung mit TP 4 und die gemeinsame Verbundsteuerung verschoben. Diese Ziele von TP 3 wurden im vollen Umfang erreicht.

Die Ziele von TP 4 bestanden im Wesentlichen aus der Entwicklung und Analyse von multikriteriell optimierenden Betriebsstrategien für Smart Grids, die mit einer simulationsbasierten Analyse bewertet werden sollten. Dieses Ziel wurde in vollem Umfang erreicht. Bezüglich der Optimierungskriterien wurde sich im Projektverlauf auf die Netzstabilität, die lokale Nutzung von erneuerbaren Energien und die Minimierung von Verhaltensanpassungskosten konzentriert.

Im Unterschied zum ursprünglichen Plan für TP 5, alle Modelle direkt mit dem Co-Simulation-Framework mosaik zu koppeln, wurden die Datenflüsse wegen unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen teilweise nur im Informationsmodell abgebildet und die Daten ausgetauscht. Hierdurch konnten die integrierten Simulationen deutlich effizienter und schneller durchgeführt werden. Somit wurden auch in diesem TP die Ziele erreicht.

TP 6 fokussierte sich im Kontext des Projektverlaufes zunehmend mehr auf die ebenenübergreifende, optimierte Netzausbauplanung und deren technische bzw. monetäre Bewertung. Die Untersuchungen bezüglich der Systemdienstleistungen und -stabilität wurden zu Gunsten der Netzoptimierung angepasst, da hier ein höherer Forschungsbedarf gesehen wurde. Zusammenfassend wurden alle im Antrag beschriebenen Themen vollständig abgeschlossen.

Das TP 7 untersuchte anhand eines disaggregierten Modells die gesamtwirtschaftlichen Effekte der Transition des norddeutschen Energiesystems mit einem drastischen Ausbau der erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2050. Dabei wurden neben Wohlfahrtseffekten die Auswirkungen auf unterschiedliche Produktionssektoren und Konsumenten, die Entwicklung der Kohlendioxidemissionen und die Zusammenhänge mit internationalem Handel, Wirtschaftswachstum, technischen Veränderungen und Strukturwandel betrachtet. Die Szenariosimulationsergebnisse ergaben zum einen eigenständige, politikrelevante Erkenntnisse und flossen zum anderen in die teilprojektübergreifende Nachhaltigkeitsbewertung ein. Alle im Forschungsvorhaben vorgesehenen Ziele wurden hierbei erreicht.

Die Ziele des TP 8 wurden erreicht. Im Projektverlauf haben sich gegenüber der ursprünglichen Zielbeschreibung zwei Abweichungen ergeben, um weitere Synergien mit anderen Teilprojekten zu heben. Die Systemgrenze für das zu modellierende System wurde in Absprache mit den anderen Projektpartnern auf das niedersächsische Stromversorgungssystem beschränkt. Pfadabhängigkeiten können in der Erweiterung der multikriteriellen Bewertung berücksichtigt werden. Für das niedersächsische Stromversorgungssystem wurden sie im Rahmen der Diffusionsforschung von TP 2 analysiert.

4 ERKENNTNISGEWINN DURCH INTERDISZIPLINÄRE ZUSAMMENARBEIT

Die Zusammenarbeit in einem interdisziplinären Projektkonsortium ist stets mit Herausforderungen, vor allem aber auch mit Chancen verbunden. Im Rahmen des NEDS-Projektes wird die interdisziplinäre Kooperation als sehr positiv bewertet. Unklarheiten in der Kommunikation durch verschiedene fachliche Hintergründe wurden von Beginn an berücksichtigt, diskutiert und effektiv gelöst, bspw. mit Hilfe gemeinsamer Definitionen und der Erstellung eines Glossars. Dadurch wurde eine gemeinsame Basis geschaffen, auf der in der Projektlaufzeit aufgebaut und die stets erweitert wurde.

Die Aufteilung des Arbeitsplans im Forschungsprojekt war mit den Teilprojekten derart gestaltet, dass die einzelnen Disziplinen fachlich tiefgehend und mit großer Expertise ihre Forschungsthemen erarbeiteten. Durch den stetigen Austausch zwischen einzelnen Teilprojekten, aber auch auf Gesamtprojektebene, konnten sowohl die jeweiligen Schnittstellen zwischen den Inhalten der Teilprojekte als auch die Gesamtergebnisse fortwährend konsistent gestaltet werden. Als Beispiel sei hier die sehr gelungene, teilprojektübergreifende Szenarientwicklung genannt, woraus ein Whitepaper resultierte. Besonders herausfordernd war die Modellintegration, da innerhalb der TP mit unterschiedlichen, zeitlichen Auflösungen gearbeitet wurde. Daher wurden nur die Modelle aus TP3 und TP4 für einen automatischen Datenaustausch über mosaik gekoppelt. Die weiteren Modelle wurden durch einen manuellen Datenaustausch gekoppelt. Hierbei mussten die Ergebnisse teilweise stark aggregiert werden, um z. B. von einer 15-minütigen auf eine jährliche Auflösung zu kommen. Diese Abstimmung konnte nur aufgrund der Bereitschaft gelingen, andere Fachperspektiven einzunehmen und mitzudenken, um gemeinsame Lösungen zu erarbeiten.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse auf Teil- und Gesamtprojektebene beruhen somit auf anspruchsvollem Fachwissen und Methoden auf der einen Seite sowie auf im Gesamtprojekt konsistenten Datengrundlagen und Interpretationen auf der anderen Seite. Einzelmodelle, die zu einem ganzheitlichen Gesamtmodell verknüpft wurden, Lösungen und Handlungsempfehlungen wurden entwickelt und tragen zu einem wesentlichen Fortschritt in der Nachhaltigkeitsbewertung bei, die im Rahmen des Projektes vorgenommen wurde.

5 WEITERFÜHRENDE PERSPEKTIVEN UND NACHHALTIGE WIRKUNGEN DES VORHABENS

Das NEDS Projekt bietet mit der neu erarbeiteten Methodik zur Abbildung von interdisziplinären Modellen und Anforderungen in einem durch ein Informationsmodell unterstützten Prozess und der Analyse dieser integrierten Szenarien eine Basis für weitergehende Untersuchungen und Forschungsprojekte. Der Ansatz ist generisch entwickelt, sodass er erstens auf weiterführende Fragestellungen³ im Kontext von Energieszenarien übertragbar ist und zweitens kein bestimmtes Energiesystemmodell und keine bestimmte MCDA-Methode voraussetzt. Sowohl einzelne Teilprojekte als auch das gesamte Konsortium können fachlich auf den Ergebnissen und Erkenntnissen aufbauen und sie als interdisziplinäre Grundlage für nachfolgende Forschung nutzen.

Insbesondere der Schwerpunkt der Nachhaltigkeit bildet ein spannendes Thema, das perspektivisch von allen Projektpartnern in ihrem Fachbereich einzeln und gemeinsam weiterverfolgt wird. Über das Netzwerk des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN) beraten die Partner fortlaufend über weitere, gemeinsame Projekte und stehen im engen Austausch miteinander. Inhaltliche Schwerpunkte könnten bei Folgeprojekten bspw. auf konkreten Umsetzungsoptionen für Potentialverschiebungen in Haushalten anhand der Ausgestaltung von Tarifmodellen oder auf der Erarbeitung weiterer Szenarien und Anwendung der entwickelten Methoden und Modelle liegen. Im Forschungsprojekt NEDS wurden außerdem Handlungsempfehlungen ausgearbeitet, die im Rahmen von Veröffentlichungen während der Projektlaufzeit, aber vor allem auch bei dem Projektabschlusssymposium im März 2019 an die Stakeholder direkt adressiert wurden. Ein ausführlicher Projektergebnisbericht wird im Rahmen der EFZN-Schriftenreihe voraussichtlich im Jahr 2019 erscheinen und sichert so die nachhaltige Wirkung des Forschungsprojekts.

Als Beispiel für weiterführende Forschung kann das Projekt „Quo vadis Energiewende? Moderation von Diskursen über den Umbau der niedersächsischen Energieversorgung“ (vgl. Kapitel 6) genannt werden. Das in der Ausschreibungslinie Zukunftsdiskurse vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur bewilligte Projekt (ZN3409) soll an die Ergebnisse des Teilprojektes 2 anknüpfen und diese in einen breiteren öffentlichen Diskurs bringen. Im Fokus des Nachfolgeprojektes soll die Fragestellung stehen, welche Erwartungen die Gesellschaft an zukünftige Geschäftsmodelle von Energieversorgern hat, wie diese wirtschaftlich erfolgsversprechend abgebildet werden und wie die Energieversorger dabei die fortwährende Unterstützung ihrer Stakeholder sicherstellen können.

³ Vgl. weiterführende Forschungsprojekte in Kapitel 6

6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT UND MEDIENRESONANZ

Im Forschungsprojekt NEDS wurde zu Beginn der Förderlaufzeit eine projekteigene Website erstellt und dort durchgängig über alle Aktivitäten informiert. Unter <https://www.neds-niedersachsen.de/> kann sich jede/r Interessierte ein Bild über die Partner, die Forschung und die Veröffentlichungen machen.

Drei Symposien wurden während der Projektlaufzeit veranstaltet, die sich an die Öffentlichkeit und weitere Stakeholder richteten. Bei dem Kick-Off-Symposium im Jahr 2015 lag der Fokus auf der direkten Einbindung der Öffentlichkeit, z. B. über Diskussionsrunden und Fragebögen, die mit großem Interesse angenommen wurden. Im Jahr 2018 wurden beim ebenfalls öffentlich ausgerichteten Zwischensymposium die entwickelte Methodik sowie erste Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Das Abschluss-symposium im Jahr 2019 diente zum einen der Information über die finalen Projektergebnisse und zum anderen der Adressierung von Handlungsempfehlungen, die im Rahmen des Projektes erarbeitet wurden. Bei allen Veranstaltungen wurden Interessenvertreter/innen direkt eingeladen und der breiten Öffentlichkeit die Möglichkeit der Teilnahme geboten. Das Publikum brachte daher unterschiedliche Hintergründe und Perspektiven mit und bereicherte somit auf vielfältige Art und Weise die Projektdiskussionen über eine nachhaltige Gestaltung des niedersächsischen Stromversorgungssystems.

Neben den Symposien wurden Projektergebnisse und -erkenntnisse auch in weiteren Veranstaltungen, z. B. bei regionalen Initiativen wie *Zukunfts[s]unternehmen Nordwest*, und mittels Veröffentlichungen (Konferenzbeiträge, Vorträge, Poster, Zeitschriftenartikel etc.) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Das Feedback war stets positiv mit konstruktiven Diskussionen, die im Nachgang in das Projekt eingeflossen sind. Eine frühe Einbindung der niedersächsischen Bürger/innen und Kenntnis der Projektergebnisse kann einen nachhaltigen Beitrag zur Akzeptanz der Energiewende in Niedersachsen liefern. Um eine breitere Beteiligung der Bürger/innen zu ermöglichen und die Ergebnisse einer größeren Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wären mehr Ressourcen für eine professionelle Kommunikations- und Kooperationsarbeit wünschenswert gewesen.

Die Einarbeitung der verwendeten Methoden, Modelle und Ergebnisse in die Lehre, sei es in Vorlesungen, Seminaren oder über studentische Arbeiten, diente ebenfalls der Dissemination.

Auf Basis der (Teil-)Ergebnisse aus NEDS wurden folgende Forschungsprojekte, z.T. bereits erfolgreich, beantragt:

- „Quo vadis Energiewende? Moderation von Diskursen über den Umbau der niedersächsischen Energieversorgung“, Forschungsvorhaben Niedersächsisches Vorab, Ausschreibung „Zukunftsdiskurse“, Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur
- „Geschäftsmodellinnovationen niedersächsischer Stadtwerke: Eine Fallstudienuntersuchung im Kontext von Energiewende und Digitalisierung“, Förderprogramm PRO*Niedersachsen, Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur
- „Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation (SiNED)“, Forschungsvorhaben Niedersächsisches Vorab, Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur

7 TABELLENTEIL DES SCHLUSSBERICHTS

7.1 LISTE DER BETEILIGTEN FORSCHER/INNEN

NAME	VORNAME	TITEL	ZEIT IM PROJEKT	TEILPROJEKT (TP)
Blank	Marita	Dr.	09/2015 - 02/2017	TP 4
Blaufuß	Christoph		04/2015 - 07/2019	TP 6
Bühler	Dorothee	Dr.	11/2018 – 07/2019	TP 7
Busse	Christian	Prof. Dr.	11/2017 - 07/2019	Leitung TP 2
Dumeier	Marcel		04/2017 - 07/2019	TP 8
Engel	Bernd	Prof. Dr.-Ing.	04/2015 - 07/2019	Leitung TP 3
			01/2017 - 07/2019	Projektsprecher
Eggert	Frank	Prof. Dr.	04/2015 - 07/2019	Leitung TP 1
Geldermann	Jutta	Prof. Dr.	04/2015 - 07/2019	Leitung TP 8
Glötzl	Markus		04/2015 - 09/2017	TP 2
Hofmann	Lutz	Prof. Dr.-Ing. habil.	04/2015 - 07/2019	Leitung TP 6
			04/2015 - 12/2017	Projektsprecher
Hübler	Michael	Prof. Dr.	04/2015 - 07/2019	Leitung TP 7
Kleinau	Maren		02/2018 - 07/2019	TP 2
Krause	Henning		07/2018 - 07/2019	TP 7
Lehnhoff	Sebastian	Prof. Dr.	04/2015 - 07/2019	Leitung TP 5
Loges	Hauke		01/2017 - 12/2017	Projektkoordinator
Luckhof	Marian		04/2015 - 09/2018	TP1
Minnemann	Julien		03/2016 - 07/2019	TP 2
Nebel-Wenner	Marvin		06/2016 - 07/2019	TP 4
Nieße	Astrid	Prof. Dr.	05/2016 - 12/2017	TP 4
Paech	Niko	apl. Prof. Dr.	04/2015 - 10/2017	Leitung TP 2
Pothen	Frank	Dr.	05/2015 - 06/2018	TP 7
Reinhold	Christian		04/2015 - 07/2019	TP 3
Rendel	Torsten	Dr.	04/2015 - 12/2016	Projektkoordinator
Schwarz	Jan Sören		04/2015 - 07/2019	TP 5
Seidel	Julia		01/2018 - 07/2019	Projektkoordinatorin
Sonnenschein	Michael	Prof. Dr.	04/2015 - 07/2019	Leitung TP 4
Stahlecker	Katharina		04/2015 - 09/2016	TP 8
Wille	Farina		04/2015 - 07/2019	TP 1
Witt	Tobias		10/2015 - 07/2019	TP 8

7.2 LISTE DER QUALIFIZIERUNGSARBEITEN

NAME	VORNAME	QUALIFIZIERUNGS- ARBEIT	TITEL (GEPLANT)	JAHR (GEPLANT)
Blaufuß	Christoph	Dissertation	Optimierte Netzausbauplanung für beanspruchte Verteilnetze unter Einbeziehung prognostizierter Randbedingungen	2020
Dumeier	Marcel	Dissertation	Optimal control strategies for grid connected battery storage	2020
Minnemann	Julien	Dissertation	The Energy Transition and its Impact on Business Model Innovation	2021
Reinhold	Christian	Dissertation	Koordinierte Betriebsführung von Netz- und Gebäudeenergiemanagementsystemen	2020
Schwarz	Jan Sören	Dissertation	Assisting the Development and Evaluation of Interdisciplinary Co-Simulation Scenarios	2020
Wille	Farina	Dissertation	Verhaltenswissenschaftliche Analyse energierelevanter Verhaltensweisen	2020
Witt	Tobias	Dissertation	Techno-ökonomische Bewertung von Energiesystemen	2019

Frau Dr.-Ing. Astrid Nieße wurde während der Projektlaufzeit auf eine Professur für Energieinformatik an die Leibniz Universität Hannover berufen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden 51 studentische Abschlussarbeiten im Gesamtprojekt betreut.

7.3 LISTE DER VERÖFFENTLICHUNGEN

7.3.1 VERÖFFENTLICHUNGEN BEI KONFERENZEN UND IN JOURNALS

AUTOREN	TITEL	KONFERENZ / JOURNAL	JAHR
Schwarz, J.S., Lehnhoff, S.	Ontological Integration of Semantics and Domain Knowledge in Energy Scenario Co-Simulation	11th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development (accepted), 17.-19. September	2019
Nebel-Wenner, M., Reinhold, C., Wille, F., Nieße, A., Sonnenschein, M.	Distributed multi-objective scheduling of power consumption for smart buildings	Energy Informatics, Springer Open (accepted), Erscheinung voraussichtlich Sept./Okt.	2019
M. Blank, C. Blaufuß, M. Glötzel, J. Minnemann, M. Nebel-Wenner, A. Nieße, F. Pothen, C. Reinhold, J. S. Schwarz, K. Stahlecker, F. Wille, T. Witt, F. Eggert, B. Engel, J. Geldermann, L. Hofmann, M. Hübler, S. Lehnhoff, N. Paech und M. Sonnenschein	Whitepaper: NEDS Szenarien - Zukunftsszenarien für eine nachhaltige Energieversorgung in Niedersachsen für das Jahr 2050	NEDS Homepage: www.neds-niedersachsen.de	2019
Ries, J., Reinhold, C., Herr, H., Engel, B.	Modular Control System for Testing of Electrical Power Systems and Energy Management Systems in elenia-energy-labs	ETG Kongress, Esslingen am Neckar, 8.-9. Mai	2019
Schwarz, J. S., Steinbrink C., Lehnhoff S.	Towards an Assisted Simulation Planning for Co-Simulation of Cyber-Physical Energy Systems	7th Workshop on Modeling and Simulation of Cyber-Physical Energy Systems (MSCPES), Montreal, Canada, 15. April	2019
Schwarz, J. S., Witt, T., Nieße, A., Geldermann, J., Lehnhoff, S., Sonnenschein, M.	Towards an Integrated Development and Sustainability Evaluation of Energy Scenarios Assisted by Automated Information Exchange	6th International Conference, SMARTGREENS 2017, and Third International Conference, VEHITS 2017, Porto, Portugal, 22.-24. April, Revised Selected Papers, Series: CCIS, Springer	2019
Witt, T., Dumeier, M., Geldermann, J.	Multi-criteria evaluation of the transition of power generation systems	Multikriterielle Optimierung und Entscheidungsunterstützung: Tagungsband GOR Entscheidungstheorie und -praxis 2018, Wiesbaden: Springer Gabler, 2019, S. 121-141.	2019

Schwarz, J.S., Lehnhoff, S.	Ontology-Based Development of Smart Grid Co-Simulation Scenarios	21st International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management, EKAW, Nancy, 13.-16. November	2018
Blaufuß, C., Hofmann, L.	Methodik zur Optimierung des Netzausbaus in beanspruchten Verteilnetzen	ETG-CIRED-Workshop 2018 (D-A-CH): Innovationen im Verteilnetz, Berlin, 13.-14. November	2018
Pothen, F., Hübler, M.	A Forward Calibration Method for New Quantitative Trade Models	Hannover Economic Papers No. 643, November	2018
Witt, T., Stahlecker, K., Geldermann, J.	Morphological analysis of energy scenarios	International Journal of Energy Sector Management Vol. 12 Issue 4, S. 525-546	2018
Wille, F., Eggert, F.	Kriterien eines nachhaltigen Stromversorgungssystems	51. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, Frankfurt (Main), 15.-20. September	2018
Pothen, F., Hübler, M.	The Interaction of Climate and Trade Policy	European Economic Review, 107, 1-26, August	2018
Reinhold, C., Wille F., Engel, B., Eggert, F.	Empirische und Synthetische Lastprognose von nutzerabhängigen Verbrauchsgeräten	15. Symposium Energieinnovation, Graz, 14.-16. Februar	2018
Diekmann, S., Reinhold, C., Engel, B.	Centralized energy management for the optimization of residential districts	International ETG Congress 2017, Bonn, 28.-29. November	2017
Reinhold, C., Engel, B.	Simulation environment for investigations of energy flows in residential districts and energy management systems	International ETG Congress 2017, Bonn, 28.-29. November	2017
Glötzel, M., Minnemann, J., Paech, N.	Research on Sustainable Energy Systems. From Feasibility Studies towards an Integrated, Transition-Oriented and Culturally Conscious Approach	International Transdisciplinarity Conference, Lüneburg, 11.-15. September	2017
Schwarz, J.S., Witt, T., Nieße, A., Geldermann, J., Lehnhoff, S., Sonnenschein, M.	Towards an Integrated Sustainability Evaluation of Energy Scenarios with Automated Information Exchange	6th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMART-GREENS), Porto, Portugal, 22.-24. April	2017
Pothen, F., Hübler, M.	A Regional Trade Model with Ricardian Productivity Gains and Multi-technology Electricity Supply	Hannover Economic Papers No. 585, März	2017
Blank, M., Blaufuß, C., Glötzel, M., Minnemann, J., Nieße, A., Pothen, F., Reinhold, C., Schwarz, J.S., Stahlecker, K., Wille, F., Witt, T., Rendel, T., Eggert, F., Engel, B., Geldermann, J., Hofmann, L., Hübler, M., Lehnhoff, S., Paech, N., Sonnenschein, M.	Whitepaper: Process for Simulation-based Sustainability Evaluation of Future Energy Scenarios	NEDS Homepage: www.neds-niedersachsen.de	2016

7.3.2 WEITERE PRÄSENTATIONEN AUS NEDS

AUTOREN	TITEL	VERANSTALTUNG	JAHR
Dumeier, M.	Simulation and optimization model for the evaluation of the contribution of electric mobility to a regenerative power supply	30th European Conference on Operational Research, Dublin, Irland	2019
Witt, T.	Multi-Period Multi-Criteria Evaluation of the Transition of Power Generation Systems	30th European Conference on Operational Research, Dublin, Irland	2019
Geldermann, J.;	Multi-criteria assessment of transition paths in energy system analysis	Workshop zum Projekt In-NOSys "Integrierte Nachhaltigkeitsbewertung und – Optimierung von Energiesystemen", Karlsruhe	2019
Witt, T.	Multi-criteria evaluation of the transition of power generation systems	OR 2018: International Conference on Operations Research, Brüssel, Belgien	2018
Witt, T.	Vorbereitung der Multikriteriellen Bewertung von Energieszenarien	Tagung GOR-AG „OR im Umweltschutz“ & GOR-AG „Supply Chain Management“, Ulm	2018
Dumeier, M	Multikriterielle Bewertung mehrperiodiger Entscheidungssituationen am Beispiel der langfristigen Planung der Stromversorgung	Tagung GOR-AG „OR im Umweltschutz“ & GOR-AG „Supply Chain Management“, Ulm	2018
Hübler, M.	The Interaction of Climate and Trade Policy	Monte Verità Conference on Sustainable Resource Use and Economic Dynamics, Ascona, Schweiz	2018
Reinhold, C.	NEDS – Simulationsmodell zur Untersuchung von Smart Home Systemen und Energiemanagementfunktionen	Tag der Energieforschung, Hannover	2017
Pothen, F.	The Interaction of Climate and Trade Policy	EcoMod, Ljubljana, Slowenien	2017
Pothen, F.	The Interaction of Climate and Trade Policy	EAERE Annual Conference, Athen, Griechenland	2017
Pothen, F.	The Interaction of Climate and Trade Policy	6th Mannheim Energy Conference, Mannheim	2017
Pothen, F.	The Interaction of Climate and Trade Policy	VWL-Kolloquium der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Oldenburg	2017

7.4 LISTE DER PROJEKTBEZOGENEN VERANSTALTUNGEN

(Programme sind beigefügt)

VERANSTALTUNG	ART DER VERANSTALTUNG	JAHR
Projektabschlusssymposium	Öffentliches Symposium	2019
Zwischensymposium	Öffentliches Symposium	2018
Statussymposium der VolkswagenStiftung	Austausch im Rahmen des Programms „Wissenschaft für nachhaltige Entwicklung“	2017
Auftaktsymposium	Öffentliches Symposium	2015

7.5 LISTE ANGEMELDETER PATENTE

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden keine Patente angemeldet.