

eXtremOS

Wert von Flexibilität im Kontext der europäischen Strommarktkopplung bei extremen technologischen, regulatorischen und gesellschaftlichen Entwicklungen

Teilprojekt TUM - Schwerpunktbereiche Dekomposition und globales Energiesystem

Projektlaufzeit 01.01.2018 – 31.03.2021

Förderkennzeichen 03ET4062C

Lehrstuhl für Energiewirtschaft & Anwendungstechnik (EWK)
(Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner)

Clara Orthofer
Daniel Zinsmeister

Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS)
(Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher)

Soner Candas

München, Juni 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autoren

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Inhalt	2
I Kurze Darstellung	1
I.1 Aufgabenstellung	1
I.2 Voraussetzungen.....	2
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	4
I.4.1 Nutzung von bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechten	4
I.4.2 Nutzung von Fachliteratur sowie Informations- und Dokumentationsdiensten	4
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	4
II Eingehende Darstellung	5
II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	5
II.1.1 AP 1.1 Zustandserfassung und Basisszenario.....	5
II.1.2 AP 1.2 Methoden	5
II.1.3 AP 1.5 Clusterung und Filterung	7
II.1.4 AP 2.1 Primärdatensammlung	7
II.1.5 AP 3.1 Sektormodelle je Land.....	8
II.1.6 AP 4 Modellierung und Auswertung	8
II.1.7 AP 4.5 Sequenzierungsansätze	9
II.1.8 AP 4.6 Dekompositionsmethoden in linearen Energiesystemmodellen	9
II.1.9 AP 4.8 Interaktive Ergebnisvisualisierung	11
II.1.10 AP 4.11 Modellierung globaler Auswirkungen technologischer Extremszenarien	11
II.1.11 AP 5.3 Öffentlichkeitsarbeit	14
II.2 Zahlenmäßiger Nachweis, wichtigste Positionen	15
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	15
II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses...	16
II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens	16
II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses	17
Quellenverzeichnis	18

I Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Hauptziel des Projektes „eXtremOS“ war es Methoden zu entwickeln und anzuwenden, die es erlauben den Wert von Flexibilität im Spannungsfeld zwischen Bedarf und Angebot zu untersuchen. Die Einflüsse der europäischen Strommarktkopplung bei extremen technologischen und regulatorischen Entwicklungen liegen dabei im Fokus der Betrachtungen.

Vor dem Hintergrund des Ausbaus Erneuerbarer Energien in ganz Europa erhält die Bereitstellung von Flexibilität über den internationalen Austausch von Energie eine zentrale Rolle im Energiesystem. Aufgrund der zentralen Lage Deutschlands sind deshalb die Entwicklungen in den Nachbarländern und die Analyse dieser Auswirkungen auf Deutschland für „eXtremOS“ von besonderem Interesse. Ein weiterer zentraler Aspekt des Projektes liegt darin, die Untersuchungen in erster Linie für Szenarien durchzuführen, die disruptive Entwicklungen aus regulatorischer und technischer Sicht berücksichtigen. Diese können einen großen Einfluss auf Angebot und Nachfrage von Flexibilität haben, auch wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit in manchen Fällen gering ist. Entwicklungen aufgrund von Technologiedurchbrüchen, kurzfristige politische Vorgaben oder gesellschaftliche Tendenzen führen beispielsweise zu derartigen Disruptionen, die direkten Einfluss auf Geschäftsmodelle und Marktvolumina haben können. Zusätzlich stellen auch Auswirkungen von Entwicklungen im Bereich der Sektorkopplung des Energieverbrauchs und neuer Trends in der Digitalisierung wichtige Zusammenhänge dar, die im Projekt untersucht werden.

Um die Ableitung von Extremszenarien auf eine breite Basis zu stellen, wird im Forschungsvorhaben eXtremOS ein multimodaler Ansatz zur Ableitung von Extremszenarien entwickelt und angewendet. Des Weiteren müssen Ansätze gefunden werden, um diese Extremszenarien in eine konsistente Datenbasis auf europäischer Ebene zu übersetzen. Hieraus werden durch Energiesystemmodellierung anschließend quantitative Zukunftsbilder gezeichnet. Die Auswertungen der Zukunftsbilder zeigen, aus welchen Komponenten das Energiesystem der Zukunft dargestellt werden kann und welche Rückwirkungen sich daraus auf die strategischen Entscheidungen privater und staatlicher Stakeholder ableiten lassen.

Die Ziele der TUM decken sich im Wesentlichen mit der Zielsetzung des Verbundprojekts. Die beiden beteiligten Lehrstühle der TUM arbeiten mit unterschiedlichen Schwerpunkten im Bereich der Modellierung und Anwendung von Energiemodellen und befassen sich dabei insbesondere mit Fragestellungen zur Ausgestaltung eines zukünftigen Energiesystems. Einerseits stellt die mathematische Weiterentwicklung der Modelle aufgrund immer komplexer werdender Strukturen ein wichtiges strategisches Ziel (ENS), darüber hinaus ist jedoch auch die methodische und datenseitige Erfassung von extremen Entwicklungen ein essentielles Instrument zur Bestimmung von relevanten Zukunftsszenarien (EWK)

Im Zuge des Teilvorhabens des Projekts eXtremOS besteht ein wesentliches Arbeitsziel aus der Analyse, Entwicklung und Aufbereitung von Dekompositionsmethoden für die Energiesystemana-

lyse. Ein weiteres wissenschaftliches Arbeitsziel ist die Integration disruptiver Entwicklungen in länderübergreifende Energiesystemmodelle. Hierzu wird ein methodischer Ansatz erarbeitet im Modell umgesetzt und anhand von Szenarien analysiert.

I.2 Voraussetzungen

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (EWK)

Der Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München forscht auf den Gebieten der Energieeffizienz und der Erneuerbaren Energien an der Schnittstelle zwischen theoretischer Methodenentwicklung und praktischer Anwendung/Validierung. Alleinstellungsmerkmal ist die experimentell gestützte Modellierung von Komponenten und Systemen, bis hin zu betrieblichen oder regionalen Energiekonzepten. Der EWK verfügt über langjährige Expertise in der Konzeption, Entwicklung und Anwendung von Energiesystemmodellen. In Kooperation mit dem International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) wurde ein Modell des Südafrikanischen Energiesystems aus einer Adaption von MESSAGE entwickelt und auf die zurzeit aktuelle Fragestellung der Emissionsauswirkung der Schiefergasnutzung angewandt.

Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS)

Der Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme (ENS) der Technischen Universität München verfügt über besondere Kompetenzen im Bereich der linearen Optimierung und der Einführung von Dekompositionsmethoden zur Reduktion von Rechenzeiten. Er bringt diese im Schwerpunkt "Modellierung und Analysemethoden" bei der Implementierung von Modellerweiterungen ein.

Am TUM-ENS werden Modelle zum besseren Verständnis der durch die Energiewende bedingten Transformationen in Wirtschaft, Technik, Recht und Gesellschaft - sowohl lokal als auch global - entwickelt. Der Fokus des Lehrstuhls liegt dabei auf der Entwicklung fortschrittlicher Methoden zur Abbildung technischer und ökonomischer Wechselwirkungen, um optimale Systemkonfigurationen im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit und Umweltverträglichkeit zu ermitteln. Die Modelle bedienen sich dabei unterschiedlicher Orts- und Zeitauflösung und ermitteln volkswirtschaftliche Kostenminima, externe Kosten von Technologienutzung sowie Umweltauswirkungen (bspw. Treibhausgasemissionen). Im Ergebnis liefern die entwickelten Modelle wichtige Kenngrößen, wie beispielsweise benötigte Speicherkapazitäten im Verhältnis zum Ausbau von Transportkapazitäten und Einspeisung fluktuierender Einspeisung (wie PV- und Windstrom).

Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Auslegung von Smart Grids auf verschiedenen regionalen Ebenen - angefangen bei intelligenten Inseln und Smart Micro Grids über dezentrale Energiesysteme für Dörfer und Stadtteile bis hin zu europaweiten Energiesystemen. Die Betrachtungen beziehen sich nicht nur auf elektrische Netze. Untersucht werden insbesondere auch Synergieeffekte durch die Kopplung von Strom-, Wärme- und Gasnetzen. Neben der Auslegung ist ebenso die Entwicklung von Betriebs- und Kommunikationsstrategien ein wesentliches Forschungsthema, sowie die Bewertung von Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit. Für die Systemauslegung und die Entwicklung von Betriebs- und Kommunikationsstrategien werden rechnergestützte mathematische Verfahren angewendet, die zukünftig in einem Smart Grid Labor getestet werden sollen.

I Kurze Darstellung

Der ENS beschäftigt sich in einem dritten Schwerpunktthema mit der Energieproblematik in Entwicklungs- und Schwellenländern und setzt derzeit auch konkrete Pilotprojekte in Simbabwe und Nepal um.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Nachfolgender Balkenplan zeigt den geplanten und realisierten Ablauf des Vorhabens. Das Projekt konnte überwiegend gemäß der zeitlichen Planung bearbeitet werden. Rote Pfeile zeigen Verzögerungen, die in einzelnen Arbeitsschritten entstanden sind.

Paket	Schritt	Task	2018				2019				2020				21
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1
AP 1.1	AS 2	Analyse der nationalstaatlichen Politiken sowie des technischen und regulatorischen Rahmens der Nachbarländer in Bezug auf die Weiterentwicklung des Energiesystems	█												
AP 1.1	AS 3	Screening und Vergleich länderspezifischer und internationaler Szenariostudien													
AP 1.1	AS 5	Trendanalysen der Energieversorgung in den 11 Weltregionen des Energiesystemmodells Message		█	█										
AP 1.2	AS 3	Unterstützung bei der Parametrisierung einer CIB-Matrix mit Minimalmodellen													
AP 1.5	AS 5	Spiegelung der ausgewählten Extremszenarien auf Globale Relevanz							█						
AP 2.1	AS 2	Primärdatensammlung	█	█											
AP 3.1	AS 1	Analyse der Primärdaten und Erarbeitung länderspezifischer Charakteristika je Sektor - GHD				█									
AP 3.1	AS 2	Festlegung einer länderübergreifenden Methodik zur Abbildung jedes Sektors - GHD					█								
AP 3.1	AS 3	Umsetzung der Abbildung jedes Sektors - GHD						█							
AP 4.5	AS 3	Verknüpfung von Teilsimulationen, Definition der Schnittstellen und der Übergabeparameter zur Nutzung von Dekompositionsmethoden							█						
AP 4.6	AS 1	Literaturrecherche von aktuellen Dekompositionsmethoden	█	█	█	█									
AP 4.6	AS 2	Entwicklung des Frameworks aus Schnittstellendefinitionen			█	█									
AP 4.6	AS 3	Ausarbeitung der Anforderungen an Dekomposition für Anwendungsfall und Szenarien			█	█	█								
AP 4.6	AS 4	Anpassungen der Dekompositionsmethode an Anwendungsfall und Szenarien				█	█	█	█	█	█	█			
AP 4.6	AS 5	Entwicklung einer ersten Version des Frameworks angepasst auf die definierten Schnittstellen					█	█	█	█	█	█			
AP 4.6	AS 6	Testreihe für Framework mit bereits erstellten Szenarien zur Ausarbeitung notwendiger Anpassungen						█	█	█	█	█			
AP 4.6	AS 7	Implementierung des Frameworks mit Einarbeitungen der Testreihe in AS 6						█	█	█	█	█	█		
AP 4.6	AS 8	Optimierung des Frameworks in Bezug auf Rechenzeit						█	█	█	█	█	█		
AP 4.8	AS 3	Testen der Plattform durch Beta User									█	█	█	█	
AP 4.11	AS 1	Evaluation der Modellstruktur (regionale & zeitliche Auflösung) je Extremszenario		█	█										
AP 4.11	AS 2	Datensammlung und mathematische Beschreibung der relevanten Szenarios			█	█	█								
AP 4.11	AS 3	Adaption des MESSAGE Modells entsprechend der Szenarioanforderungen				█	█	█							
AP 4.11	AS 4	Mathematische Implementierung der Szenarios in die Modellstruktur					█	█	█						
AP 4.11	AS 5	Evaluation der Auswirkungen der globalen Extremszenarios auf die deutsch-/europäischen Energiemärkte								█	█	█	█	█	█
AP 5.3	AS 1	Bereitstellung des open-source Frameworks auf GitHub, Erstellung eines MOOC über das Dekompositions-Framework aus AP 4.6									█	█	█	█	█
AP 5.3	AS 2	Verfassung von Veröffentlichungen					█				█	█	█	█	█
AP 5.3	AS 3	Organisation und Durchführung einer öffentlichen Abschlussveranstaltung												█	█

Ursprünglich hatten wir im Februar 2020 in Abstimmung mit den Projektpartnern eine kostenneutrale Verlängerung beantragt, da bei Projektpartnern durch Elternzeit die Verfügbarkeit der Mitarbeiter*innen zeitweise eingeschränkt war. Durch die Corona Epidemie haben sich jedoch auch bei uns Verzögerungen ergeben. Diese konnten jedoch im Rahmen der Verlängerung vollumfänglich aufgeholt werden.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

I.4.1 Nutzung von bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechten

Es wurden gängige Verfahren zur Modellierung und Simulation von energietechnischen Systemen verwendet, als Softwareplattform wurde MESSAGEix [9] eingesetzt. Schutzrechte waren nicht tangiert.

Für die Arbeiten um die Dekompositionsmethoden wurden als Softwareplattformen urbs [10] (TUM-ENS) und ISaAR-light [2] (FfE) eingesetzt.

I.4.2 Nutzung von Fachliteratur sowie Informations- und Dokumentationsdiensten

Die in Datenbanken, wie Researchgate oder Sciencedirect geführte einschlägige Fachliteratur wurde laufend anhand relevanter Schlagwörter (z.B. Energy Modelling, Decomposition) durchsucht und ausgewertet.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekts eXtremOS wurde in Kooperation mit der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), dem Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) der KIT und der Agora Energiewende bearbeitet. Zur Abstimmung wurden regelmäßig Projekttreffen abgehalten. Insbesondere mit den Kollegen der FfE fand ein intensiver Austausch zur Dekomposition und zur globalen Energiesystemmodellierung statt auf Bearbeiterebene statt.

II Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die im Rahmen des Verbundprojekts erzielten Ergebnisse genannt. Die Darstellung der Ergebnisse wird dabei in die bearbeiteten Teilprojekte gegliedert und jeweils angegeben, welche Lehrstühle (ENS, EWK) beteiligt waren.

II.1.1 AP 1.1 Zustandserfassung und Basisszenario

Ziel des APs ist die Erfassung und Beschreibung des aktuellen regulatorischen Rahmens und der technologischen Perspektiven und Szenarien zur Transformation der Energieversorgung je Land.

ENS und EWK haben dazu die national-staatlichen Politiken sowie den technische und regulatorische Rahmen der Nachbarländer in Bezug auf die Weiterentwicklung des Energiesystems beschrieben und analysiert. Darüber hinaus wurden die Strukturen der Energieversorgung in den 11 Weltregionen durch Trendanalysen beleuchtet. Für die Analyse wird dabei das Energiesystemmodell MESSAGEiX der IIASA genutzt.

Aus diesem Arbeitspaket ging eine Meta-Analyse zu den länderspezifischen und gesamteuropäischen Studien zur Energiezukunft der Nachbarländer Deutschlands hervor. Aus dieser Analyse wurden dann 1) die Länderprofile zusammengestellt, die länderspezifische Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu verschiedenen energietechnischen Aspekten darstellen und 2) die Analysediagramme generiert, aus denen ein verallgemeinerter, länderübergreifender Überblick über die Energiezukunft über alle Länder hinweg erstellt wurde.

Durch diese Darstellungen werden die Möglichkeiten innerhalb des breiten Spektrums der Ergebnisse für jedes Land identifiziert werden können. Besondere Erkenntnisse wurden aus den Analysediagrammen gewonnen. Insgesamt zeigen die Trendszenarien keine großen Veränderungen in der Endnachfrage, wohingegen es einen gemeinsamen Fortschritt in Richtung Elektrifizierung im Verkehr und bei der Wohnraumbeheizung gibt. Windenergie wird als die relevanteste expandierende EE-Technologie auf dem europäischen Markt identifiziert, wobei sie mit der Wasserkraft konkurriert, was die jährliche Stromproduktion angeht. Die in jeder länderspezifischen Studie diskutierten Import/Export-Betrachtungen wurden als einseitig zugunsten des Exports befunden, was auf eine unzureichende Koordination zwischen den nationalen Politiken hinweist. Nur für einige wenige Länder wird der Ausstieg aus der Kernenergie nicht diskutiert. Andererseits gibt es in mehr als der Hälfte der Länder mindestens ein nukleares Szenario, was darauf hindeutet, dass es bis heute keine gemeinsame, schlüssige Basis bezüglich der nuklearen Ziele gibt.

II.1.2 AP 1.2 Methoden

Dieses AP verfolgt zwei Ziele. Zum einen sollen zur Herleitung von Extremszenarien auf Methoden im Bereich der Trend- und Zukunftsforschung zurückgegriffen werden und so vorbereitend auf AP 1.4 relevante Variablen bzw. deren Ausprägung für Extremszenarien bezüglich des Energiesystems

II Eingehende Darstellung

identifiziert werden. Zum anderen sollen über die Methoden im Bereich der Trend- und Zukunftsforschung reflektiert und notwendige Weiterentwicklungen identifiziert und während der Herleitung implementiert werden.

Als Ergebnis dieses Arbeitspakets wurde ein Bericht verfasst [12]. Dieser Bericht besteht aus der Diskussion und den Modellimplementierungen der Deskriptoren, die vom KIT ITAS für soziale, politische, wirtschaftliche und energiebezogene Faktoren identifiziert wurden, die auf die Entwicklung des zukünftigen deutschen Stromsystems wirken. Von den 26 vom ITAS vorgeschlagenen Deskriptoren wurden 10 als geeignet angesehen, um sie quantitativ in einem Energiesystemmodell zu bewerten. Diese sind in Tabelle 1 aufgeführt. Für die Modellierung des deutschen Stromsystems im Jahr 2050 wird das Framework urbs verwendet. urbs ist ein Open-Source-Energiesystemmodellierungsframework, das am Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme der Technischen Universität München entwickelt wurde und lineare Programmierung zur Optimierung des kostenoptimalen Ausbaus und Dispatchs einsetzt [10]. Um eine Basislinie zu setzen, wurde zunächst ein Referenzmodell für das Jahr 2050 mit bestimmten Preisannahmen erstellt. Dann wird dieses Referenzmodell für jeden Deskriptor mit variierenden Werten der eingestellten Parameter neu optimiert. Anhand der gestörten Modelle wird der Einfluss der Deskriptoren auf das Energiesystem quantifiziert. Die Modellergebnisse wurden dann mit ITAS kommuniziert, um ein Verständnis über den Einfluss der Deskriptoren auf das kostenoptimale Energiesystem zu schaffen.

Tabelle 1. Ausgewählte Deskriptoren für die Energiesystemmodelle.

#	Deskriptor	Angepasste Parameter im Energiesystemmodell
3	Klimapolitik	Zugelassene CO ₂ Emissionen
5	Weltweit Marktpreise der fossilen Brennstoffe	Güterpreise
9	Bevölkerung	Strombedarf
13	Verfügbarkeit der Energie	DSM
14	BIP	Strombedarf
16	Zugang auf natürliche Ressourcen	Verfügbarkeit des Erdgases im Modell
20	Ausbau der Erneuerbaren	Gesetzte erneuerbare Kapazitäten
21	Ausbau der elektrischen Netzinfrastruktur	Zulassung neuer Interkonnektorkapazitäten
23	Verfügbarkeit der natürlichen Ressourcen	Verfügbarkeit des Erdgases im Modell
24	Innovative Kapazität	Einführung neuer Technologien

II.1.3 AP 1.5 Clusterung und Filterung

In diesem Arbeitspaket wurden Extremszenarien aus den unterschiedlichen Ansätzen (AP 1.2 – AP1.4) in Cluster zusammengefasst, gefiltert und anschließend besinder relevante ausgewählt.

Wie in **Abbildung II-1** dargestellt, wurden aus den Storylines zwei eigenständige Szenarien abgeleitet und teilweise weiter untergliedert [2 -> scenarios]:

- quEU (quit EU) beschreibt ein Szenario, dass von einem fragmentierten Europa ohne Ziele zum Klimaschutz ausgeht. Die kann als worst-case Szenario gesehen werden.
- solidEU beschreibt ein kooperatives und stärker integriertes Europa, dass sich teils sehr ambitionierte Klimaziele setzt. Daraus wurden die folgenden Unterszenarien abgeleitet:
 - In **NTC2020**: werden die Kuppelkapazitäten zwischen den Ländern auf dem Stand von 2020 eingefroren, es erfolgt kein weiterer Ausbau.
 - **PVBat** geht von deutlichen Kostenreduktionen für PV und Batteriesysteme aus.
 - Im Szenario **Lyze** wird eine schnelle Kostendegression für Elektrolysekapazitäten zur Herstellung von Wasserstoff unterstellt.
 - **RiNo** geht von einem deutlichen Ausbau der Stromerzeugung aus offshore Windparks in der Nordsee aus und entsprechenden Stromflüssen in das Europäische Stromnetz.

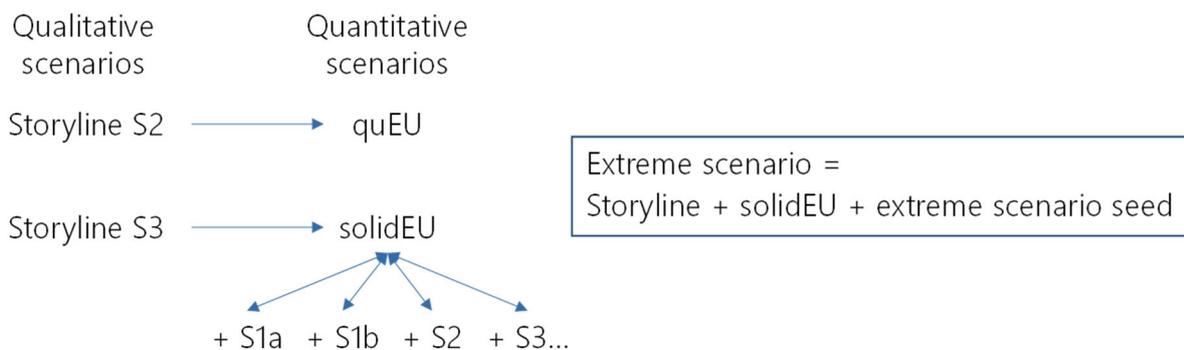


Abbildung II-1: Szenarioentwicklung [2]

Die Bearbeitung dieses AP wurde vor allem von ITAS durchgeführt und mit den übrigen Projektpartnern durch Erarbeiten und Bereitstellen von Informationen und Diskussion abgestimmt.

II.1.4 AP 2.1 Primärdatensammlung

In diesem Arbeitspaket werden die Grundlagen für das Arbeitspaket 3 gelegt, in dem alle notwendigen Primärdaten möglichst in der räumlichen Auflösung „NUTS-3“ zur Verfügung gestellt werden. Das Arbeitspaket gliedert sich in die drei Unterarbeitspakete „Primärdatenquellen“, „Aufbereitung“ und „Ablagestruktur“.

Dazu wurden die Primärdaten hinsichtlich ihrer Detailtiefe und der Richtigkeit analysiert, interpretiert und validiert. Es wurden ebenso Daten zu den erneuerbaren Energien je Land, Daten für die Fernwärmebereitstellung je Land und Daten zur Beschreibung jedes Sektors je Land erhoben.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes hat ENS bei der Validierung der Endenergieverbrauchsdaten der Nachbarländer Deutschlands nach Sektoren unterstützt. Hierfür wurden länderspezifische Energiestudien als Referenz herangezogen und mit den von der Europäischen Kommission bereitgestellten EUROSTAT-Daten verglichen. Im Ergebnis wurden nur minimale Abweichungen festgestellt, die größtenteils auf Unterschiede in den Sektordefinitionen und der Wahl des Basisjahres zurückzuführen sind. Auf diese Weise konnte die Verwendung dieser Daten in den im Projekt erstellten Energiesystemmodellen sicher begründet werden.

Für 16 Länder wurden Daten zur Energieversorgung recherchiert und sind als Ländersteckbriefe arufbar (<https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/extremos-laendersteckbriefe-fuer-16-europaeische-laender-erstellt>).

II.1.5 AP 3.1 Sektormodelle je Land

Das Ziel des Arbeitspaketes 3.1 ist die vereinfachte Abbildung der Sektoren private Haushalte, GHD, Industrie und Verkehr je Land sowie deren zukünftige Entwicklung in Anlehnung an die Methodik, wie sie im Projekt Dynamis [13] entwickelt wurde.

Dabei war zu prüfen, ob und wie die Modelle aus Dynamis mit einem geeigneten Detaillierungsgrad auf Nachbarländer angewandt werden können und welche individuellen Landesspezifika zu berücksichtigen sind. EWK war an den Arbeitsschritten dieses Arbeitspaketes, insbesondere zum Sektor GHD beteiligt.

Die Ergebnisse wurden auf der OpenData Plattform der FfE veröffentlicht: <http://opendata.ffe.de/dataset/final-energy-consumption-per-sector-energy-source-and-application-europe-nuts-0>

II.1.6 AP 4 Modellierung und Auswertung

Durch die Steigerung der Komplexität des zu modellierenden Systems im Zuge von Extremszenarien und der genaueren Abbildung der elektrischen Nachbarn steigen die Rechenzeiten drastisch an, wie in **Abbildung II-2** dargestellt ist. Folglich sind Methoden zur Komplexitätsreduktion dringend erforderlich. Hierunter fallen neue Ansätze zur Sequenzierung von Berechnungsabläufen (AP4.5) und die Einführung von Dekompositionsansätzen (AP4.6). An dieser Stelle knüpft das Projekt eXtremOS an das Projekt DecEnSys an. Durch eXtremOS erhielt ENS die Möglichkeit, die im stärker methodisch orientierten Projekt DecEn-Sys generierten Weiterentwicklungen anzuwenden und zu validieren. Die in eXtremOS insbesondere betrachteten Extremszenarien erforderten weitere Anpassungen der Modelle und legten den Fokus vor allem auf die Ermittlung robuster Ergebnisse im Umfeld unsicherer Entwicklungen.

Runtime analysis for an example linear model

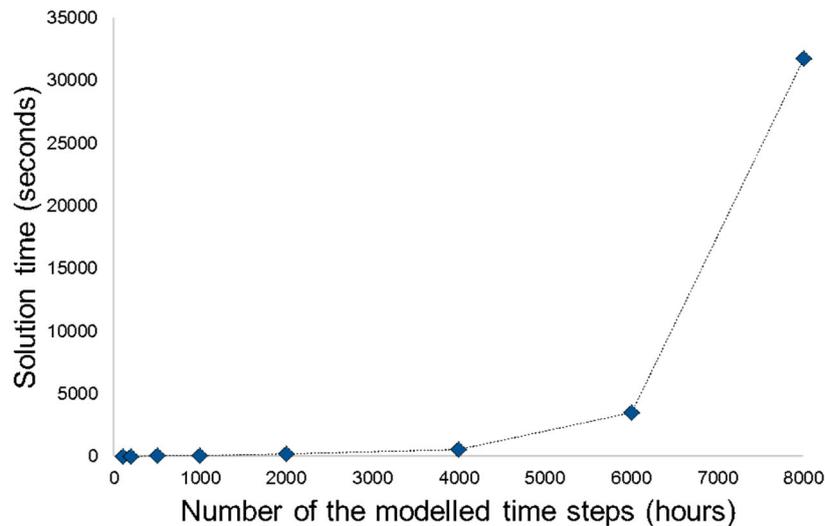


Abbildung II-2: Entwicklung der Rechenzeit für ein lineares Energiesystemmodell

II.1.7 AP 4.5 Sequenzierungsansätze

Der ENS erarbeitet zusammen mit der FfE in AP 4.5 den Arbeitsschritt (AS) 3. Die wesentliche Aufgabe liegt dabei in der Definition und Erarbeitung geeigneter Schnittstellen, welche für die Anwendung des in AP 4.6 entwickelten methodischen Rahmens an Dekompositionsverfahren notwendig ist.

Je nach Modellauslegung ist ein unterschiedlicher Schwerpunkt bei den zu übergebenden Variablen zu setzen. Die Dekomposition kann sich z.B. auf die räumliche Aufteilung oder den zeitlichen Ablauf beziehen.

Innerhalb dieses Arbeitspakets erfolgte eine Abstimmung mit der FfE, um die Kopplungsschnittstelle des Dekompositions-Frameworks (bezeichnet als admMATLAB) mit dem ISAaR-Modell zu definieren. Da eine regionale Dekomposition gewählt wurde und ISAaR mit einer matrix-/vektorbasierten Problemformulierung arbeitet, wurde ein automatisierter Annotationsvektor, der die Kopplungsvariablen (Leistungsflüsse durch die Übertragungsleitungen, die die Regionalcluster verbinden, und deren Kapazitäten) indiziert, von ISAaR an admMATLAB übergeben. Anhand dieser Vektoren wurden die Teilprobleme generiert und anschließend durch das Dekompositionsverfahren gelöst. Nach erfolgter dekomponierter Lösung wurden die Teillösungen wieder in das ursprüngliche Format zurückgeführt, so dass die Nachbearbeitungsschritte des ISAaR-Modells wie gewohnt erfolgen konnte.

II.1.8 AP 4.6 Dekompositionsmethoden in linearen Energiesystemmodellen

In AP 4.6 wird ein Rahmen aus Werkzeugen entwickelt, welcher möglichst universell auf verschiedene Energiesystemmodelle angewendet werden kann. Die Ankopplung soll möglichst ausschließlich über die genaue Beschreibung der Schnittstellen erfolgen können.

Aus den herausgearbeiteten Schnittstellen werden im nächsten Schritt das Framework zur Modellaufteilung entwickelt:

Bei der Dekomposition von Optimierungsproblemen entstehen im Allgemeinen ein Masterproblem und mindestens ein Subproblem. Das Framework steht in diesem Projekt für diese Aufteilung des Problems in Master- und Subprobleme. Je nach Anforderung und Anwendung kann diese Aufteilung unterschiedlich erfolgen: So könnte beispielsweise bei einer regionalen Dekomposition im Masterproblem vor allem die Optimierung der Leitungen zwischen den verschiedenen Regionen, in den Subproblemen die Einsatzplanung vorgenommen werden.

Zur Dekomposition gibt es verschiedene Herangehensweisen. Die Wahl der geeigneten Dekompositionsmethode muss also zum einen das ursprünglich zugrundeliegende Optimierungsproblem nach den Kopplungspunkten untersucht werden, die eine einfache Teilung verhindern. In der Literatur wird dabei zwischen „complicating constraints“ und „complicating variables“ unterschieden. Im ersten Fall entsteht die Kopplung dadurch, dass eine oder mehrere Nebenbedingungen Variablen mehrerer Regionen enthalten. Daher ist eine einfache Entkopplung nach Regionen nicht mehr möglich. Der Fall „complicating variables“ beschreibt das Problem, dass eine oder mehrere Variablen in mehreren Nebenbedingungen vorkommen. Abgesehen von diesen Variablen, wäre eine Trennung aufgrund der Blockstruktur der Nebenbedingungen möglich. Je nach Art der Kopplung gibt es verschiedene Methoden wie Benders Dekomposition oder dem Dantzig-Wolf-Algorithmus, mit dem solche Probleme dekomponiert werden können-

Nach der Identifizierung der Schnittstellenpunkte mit dem ISAAr-Framework wurde das Dekompositionsframework admMATLAB dazu integriert, um eine dekomponierte Lösung der von ISAAr erstellten Energiesystemmodelle zu ermöglichen. Die Dekomposition wurde aufgrund der bereits vorhandenen Blockstrukturen, die die Trennung der Teilprobleme erleichtern, in regionaler Weise vorgenommen. Als spezifisches Zerlegungsverfahren haben wir nach einer Vergleichsstudie die „alternating direction method of multipliers“ (ADMM) gewählt. Es hat sich gezeigt, dass ADMM im Vergleich zur Benders-Zerlegung bei großen Problemen genauso gut funktioniert und dabei nur minimale Eingriffe in das ursprüngliche Problem verursacht, so dass es sich als die geeignetere Methode für die Implementierung in die bereits vorhandenen Modellierungsrahmen erwies. Die flexible Art und Weise, in der die Schnittstelle entwickelt wurde, erlaubt ihren Einsatz nicht nur auf jedem für ISAAr vorbereiteten Datensatz, sondern sogar auf jeder gegebenen Standard-Matrixform eines Optimierungsproblems, solange eine Annotation jeder Modellvariablen für ihre Zuordnung zu den Teilproblemen mitgeliefert wird (siehe Abbildung). Dieses Dekompositions-Framework wurde auch zusätzlich in das urbs-Framework integriert.

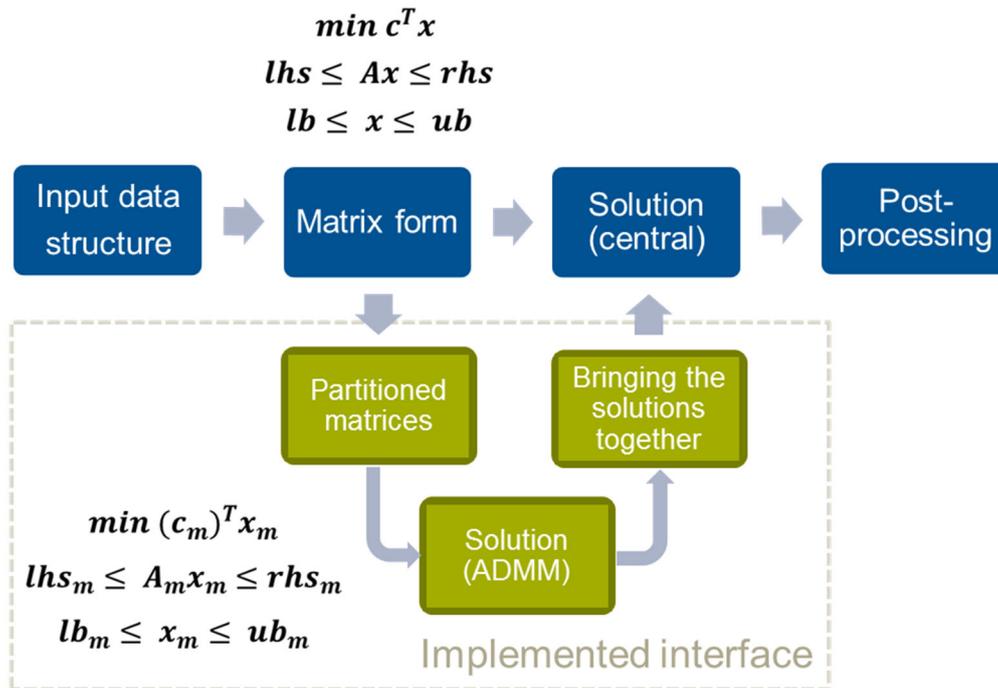


Abbildung II-3: Workflow der ISAaR-ADMM Schnittstelle

Nach der Implementierung einer Reihe von verschiedenen ADMM-Varianten wurden verschiedene Testläufe durchgeführt, um deren Rechenleistung zu analysieren. Diese Variationen bestanden aus mehreren Dimensionen: a) fünf Update-Methoden, die sich in der Art und Weise unterscheiden, wie die Teilprobleme bei jeder Iteration koordiniert werden, b) wie die Teilprobleme gelöst werden (z. B. sequentiell, synchron parallel oder asynchron parallel) und c) Hardware-Betrachtungen wie die Anzahl und der Typ der verwendeten realen Prozessoren/Logikkerne für die Lösung des Modells. Für diese Testläufe wurde ein bereits vorhandener Datensatz, bestehend aus dem europäischen Stromsystem, verwendet. Im Ergebnis bietet die Dekomposition Vorteile, wenn die Berechnungszeit der Probleme ansonsten mehr als linear wächst. Weitere Details zur Analyse liefert der Deep-Dive-Bericht [11].

II.1.9 AP 4.8 Interaktive Ergebnisvisualisierung

Die Projektergebnisse sollen in einer anschaulichen und verständlichen Weise präsentiert werden. Dazu wurde an der FfE eine Webseite aufgebaut: <https://extremos.ffe.de> [2].

ENS und EWK haben zu dieser Webseite Inhalte und Grafiken insbesondere im Bereich der Dekomposition und der globalen Energiesystemmodellierung erarbeitet und bereitgestellt.

II.1.10 AP 4.11 Modellierung globaler Auswirkungen technologischer Extremszenarien

Im Kontext des AP4.11 werden die Systemgrenzen der Betrachtung erweitert. Hier wird in einem zu den Arbeiten der Projektpartner parallelen Ansatz, das EWK ein Modell entwickeln, mit dem sich die Wechselwirkungen zwischen dem globalen Energiesystem und dem deutsch-/europäischen Energiemarkt (Ressourcen, Märkte, Energie- und Klimapolitik) beschreiben lassen. Ergänzend zu den oben erläuterten Detailanalysen können so einerseits globale Auswirkungen von Extremszenarien

abgebildet werden, andererseits Effekte globaler disruptiver Entwicklungen auf Deutschland und Europa untersucht werden.

MESSAGE ist das Energiesystemmodell des renommierten International Institutes for Applied Systems Analysis (IIASA) und wurde für die Entwicklung von Energieszenarien und die Ermittlung von sozioökonomischen und technologischen Strategien entwickelt. MESSAGE bietet einen flexiblen Rahmen für die umfassende Bewertung großer Energieherausforderungen. Die Modellergebnisse liefern Kernvorgaben für große internationale Szenarienstudien wie das Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC), den World Energy Council (WEC), den Deutschen Beirat für globale Veränderungen (WBGU), der europäischen Kommission und zuletzt die Global Energy Assessment (GEA).

MESSAGE ist darauf ausgelegt, einerseits künftigen Unsicherheiten abzubilden und andererseits die Entwicklung von robusten Technologiestrategien und damit verbundenen Anlageportfolios abzubilden. Die Modellergebnisse geben Auskunft über die Nutzung der heimischen Ressourcen, Energieimporte und Exporte sowie handelsbezogene Geldmengenströme, Investitionsanforderungen, die Art der produzierten Produktions- oder Umwandlungstechnologien, Schadstoffemissionen und Inter-Treibstoff-Substitutionsprozesse sowie zeitliche Trajektorien der Energieströme zwischen primär und nützlichem Energieniveau.

Um die Auswirkungen der ausgewählten globalen Extremszenarien im Rahmen des Arbeitspakets 5 ganzheitlich zu bewerten, ist die Integration von sektoralen Modellen ein zentrales Thema. MESSAGE verknüpft durch seine Ensemble-Modellintegration Werkzeuge für Abbildung der Energieversorgung, der Nachfrage- und Endverbrauchsanalyse sowie die "Top-down" - und "bottom-up" Analytik und erlaubt dadurch die individuelle Ausgestaltung der Modellschärfe je Szenario. Die so entwickelten globalen Szenarionarrative sowie die Ergebnisse der Modellierung derselben stellen eine Ergänzung der Analyse der deutsch-/europäischen Extremszenarios dar. Besonderer Wert wird dabei auf die Evaluation der Auswirkungen der globalen Extremszenarios auf die deutsch-/europäischen Energiemärkte gelegt, wodurch die deutsch-/europäische Analyse der Projektpartner gestärkt und in einen globalen Kontext gesetzt werden kann.

In diesem multigranularen Regionalitätsmodell sind die nationalen Modelle über die global verfügbaren Ressourcen und die Dynamik der internationalen Energiemärkte sowie über das globale Emissionsbudget mit dem globalen Modell verbunden. Auf diese Weise können die globalen Auswirkungen der technologischen und regulatorischen Entwicklungen des Energiesystems in Europa, den Schwellenländern und der ganzen Welt bewertet werden. Mit diesem Ansatz konnten die globalen Auswirkungen des Auftretens von Extremszenarien auf dem deutschen/europäischen Energiemarkt abgebildet und gleichzeitig die Auswirkungen disruptiver globaler Entwicklungen auf den Rest der Welt, insbesondere auf die besonders verwundbaren Energiesysteme ressourcenreicher Schwellen- und Entwicklungsländer, bewertet werden.

Abbildung II-4 stellt die elf Regionen dar, in die das globale Energiesystemmodell aufgegliedert ist. Eine zwölfte, virtuelle Region verbindet diese als globaler Handelsknoten.

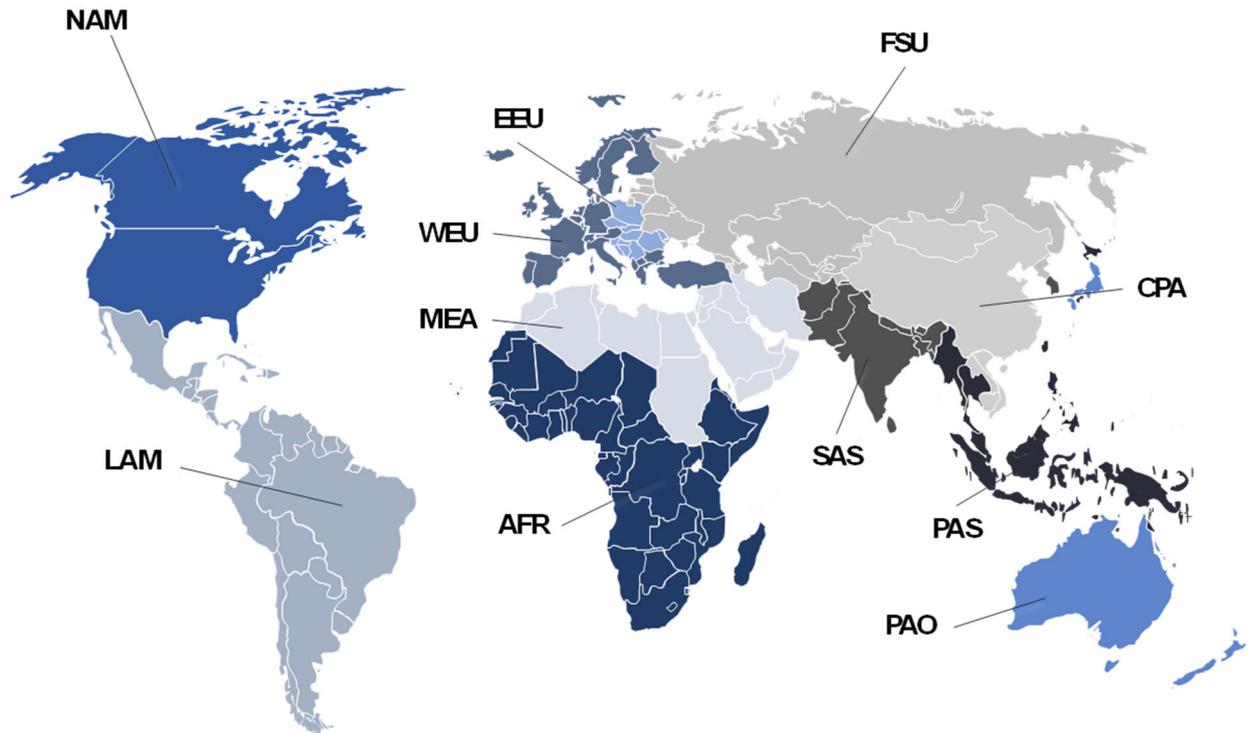


Abbildung II-4: Regionale Aufgliederung des globalen Energiesystemmodells.

Parallel zu den vier eXtremOS Szenarien wurden Analysen für drei globale Szenarien durchgeführt:

- **BAU:** Das erste Szenario definiert das Business-as-usual-Szenario und damit das kontrafaktische Referenzszenario.
- **Global Ambition:** Im zweiten Szenario, dem globalen Ambitionsszenario, wurden die nationalen THG-Emissionsziele, wie sie im Rahmen des UNFCCC zugesagt wurden, als exogene THG-Emissionsgrenzwerte in das Modell implementiert.
- **Global Change:** Das dritte Szenario, das Szenario des globalen Wandels, baut auf dem zweiten Szenario auf. Zusätzlich zu den nationalen THG-Emissionsgrenzwerten wird in diesem Szenario jedoch eine globale Obergrenze für THG-Emissionen festgelegt, um sicherzustellen, dass die globalen Emissionen bis zum Ende des Jahrzehnts auf einen 2°C-konformen Kurs gebracht werden.

Das solidEU-Szenario liegt zwischen den Szenarien "Globaler Ehrgeiz" und "Globaler Wandel", da es eine Begrenzung der THG-Emissionen für ganz Europa vorsieht.

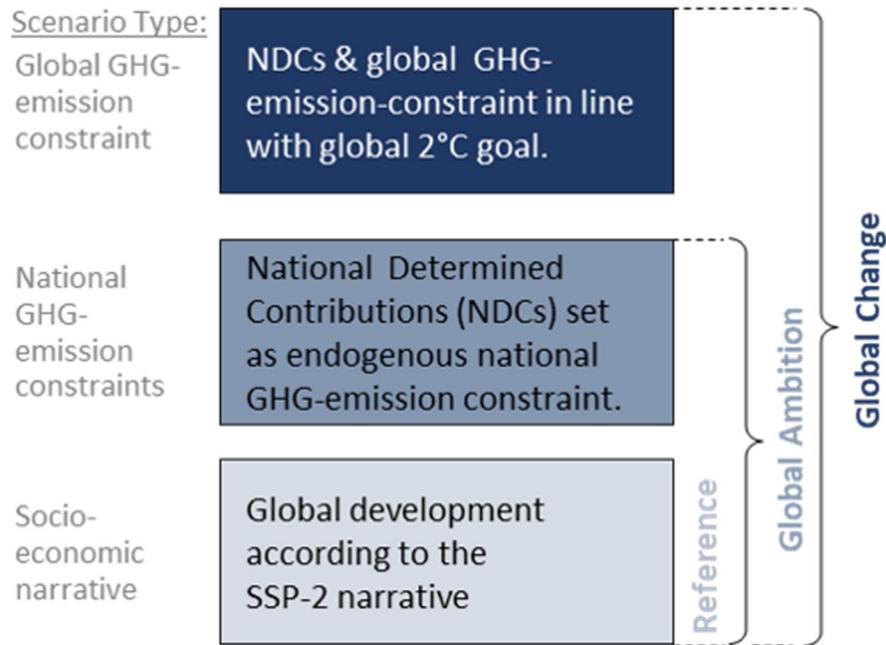


Abbildung II-5: Übersicht über die Szenarien für die globale Modellierung

Die Ergebnisse der Szenarioanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die globalen Treibhausgasemissionen können durch eine Änderung der Energieversorgung in Verbindung mit einer angepassten Endnutzung der Energie erheblich reduziert werden.
- Die derzeitigen Emissionsreduktionszusagen, wie sie in den NDCs festgelegt sind, sind nicht "extrem" genug. Sie werden zwar die Treibhausgasemissionen reduzieren und damit den Klimawandel begrenzen, aber der daraus resultierende globale Emissionspfad wird dennoch weit über dem Pfad liegen, der zu einer global angestrebten anthropogenen globalen Erwärmung von weniger als 2 °C, geschweige denn maximal 1,5 °C führt.
- Daher müssen die globalen Ambitionen gestärkt werden. Insbesondere müssen gemeinsame Strategien entwickelt werden, um die notwendige wirtschaftliche Entwicklung von Entwicklungs- und Schwellenländern so emissionseffizient wie möglich zu gestalten.

II.1.11 AP 5.3 Öffentlichkeitsarbeit

Entwickelte Methoden und Studienergebnisse wurden durch Fachveröffentlichungen in einschlägigen Zeitschriften und Präsentationen auf Konferenzen der Fachwelt zugänglich gemacht [1-4, 8, 11]. Darüber hinaus sind Datensätze und Modelle auf Internetplattformen allgemein zugänglich [6, 7, 9, 10].

Neben der Veröffentlichung der Tools und dem dazugehörigen Programmcode wurde jeweils auch eine ausführliche Beschreibung bereitgestellt, welche die Nutzung der Tools auch für andere Anwender von Energiemodellen ermöglicht und vereinfacht. Zu diesem Zweck wurde auch ein MOOC

(Massive Open Online Course) bereitgestellt, welcher darüber hinaus auch für Lehrzwecke eingesetzt werden kann [5].

II.2 Zahlenmäßiger Nachweis, wichtigste Positionen

Mit rund 378.000 € und damit über 98%, dominieren die Personalkosten für wissenschaftliche Mitarbeiter*innen die Ausgaben des Projektes. Die restlichen rund 2% wurden vor allem durch Reisekosten verursacht.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten der Zuwendungsempfänger der Technischen Universität München trugen alle zu den förderpolitischen Zielen im Rahmen des sechsten Energieforschungsprogramms der Bundesregierung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ bei.

In letzter Zeit zeichnet sich ein Trend zu mehr Komplexität bei der Modellierung von Energiesystemen ab. Um länderübergreifend konsistente Ergebnisse zu erhalten, decken die Modelle immer größere geografische Bereiche ab, bis hin zu kontinentalen und sogar weltweiten Skalen. Um Synergiepotenziale aufzudecken und sektorneutrale Emissionsbudgets zu erfüllen, werden zudem zunehmend mehrere Sektoren wie Strom, Wärme und Mobilität kooptimiert. Zusätzlich werden viele Technologien detaillierter modelliert, um das komplexe Betriebsverhalten der Systemkomponenten zu erfassen. Auch entsteht ein Bedarf an skalierbaren Methoden, um mehrskalige Energiesystemmodelle mit definierten Schnittstellen zu organisieren. Dieser Trend zu höherer Komplexität und größerem Umfang bringt jedoch rechnerische Herausforderungen mit sich. Diese lassen sich in zwei Aspekte gruppieren: a) möglicherweise superlinearer Anstieg der Laufzeit, b) Beschränkungen des Speichers (RAM) bei der Handhabung dieser sehr großen Modelle. Die im Rahmen des eXtremOS-Projekts entwickelten Dekompositionsverfahren zielen daher darauf ab, diese Skalierbarkeitsprobleme anzugehen und auch bei sehr hoher regionaler und sektoraler Detaillierung gut handhabbare Modelle zu erhalten. Darüber hinaus wurde in diesem Projekt ein hohes Maß an Transparenz und Reproduzierbarkeit erreicht, da die entwickelten Dekompositions-Toolkits vollständig verfügbar und dokumentiert sind.

Die Analyse des Energiesystems Deutschland im europäischen und globalen Kontext steht in Übereinstimmung mit dem strategischen Förderthema „Fachlich-thematische Analysen“ und „Datenbasis und Kohärenz der Modelle“. Die Arbeiten zur Dekomposition von Energiesystemmodellen trägt zu den strategisch wichtigen Förderthemen „Methodische Weiter- und Neuentwicklung von Energiemodellen“. So werden Energiesystemmodelle hinsichtlich Problemreduktionsmethoden, der Sektorkopplung und der Analyse von regulatorischen Rahmenbedingungen im europäischen Kontext weiterentwickelt.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die erarbeiteten Projektergebnisse werden in künftigen Forschungsaktivitäten Eingang finden und ebenso in die Lehre sowie zur Ableitung von wissenschaftlichen Erkenntnissen für Studien- und Abschlussarbeiten einbezogen.

Die von ENS verfolgten Projektaufgaben verbessern das wissenschaftliche Know-how auf drei synergetische Arten. Erstens wurde ein Kurs (MOOC) konzipiert, der den theoretischen Hintergrund der mathematischen Dekomposition und ihre Relevanz/Notwendigkeit für die zukünftige Modellierung von Energiesystemen vermittelt. Zweitens wurde eine gut dokumentierte und flexible Dekompositionsmethode entwickelt, die einen minimalen Eingriff in den bestehenden Modellrahmen hat und zur Nutzung zur Verfügung steht. Schließlich wurde diese Dekompositionsmethode auf einen bereits existierenden Energiesystemmodellierungsrahmen angewandt, wodurch ein umfassender Vergleich verschiedener Dekompositionsuntermethoden durchgeführt werden konnte. Auf diese Weise stellen diese drei Beiträge für Forscher, die sich mit der Modellierung von Energiesystemen beschäftigen und Modelle mit hoher Skalierung und Auflösung erstellen wollen, die auf andere Weise nicht durchführbar sind, die logische Kombination der erforderlichen Schritte dar, um sich in das Thema einzuarbeiten - 1) ausgehend von der Schaffung eines grundlegenden Verständnisses für die Dekomposition, 2) Bereitstellung der erforderlichen Software-Werkzeuge, um die Dekomposition in ihre Frameworks zu integrieren und 3) fundierte Entscheidungen über die spezifisch eingesetzte Methode auf der Grundlage der im Projekt durchgeführten Laufzeitvergleichsstudie. Auf diese Weise strebt ENS an, dass ein wichtiges Verständnis für das Thema und seine Relevanz erhalten bleibt und eine deutliche Erleichterung der Eintrittsbarrieren für die Implementierung dieser Methoden erreicht wird.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Durchführung des Vorhabens wurden weitere State-of-the-Art-Varianten des Dekompositionsverfahrens ADMM, vor allem das asynchrone ADMM, identifiziert. In der Literatur hat sich gezeigt, dass die asynchrone Variante gewisse Laufzeitvorteile hat, insbesondere wenn die Teilprobleme stark variierende Modellgrößen aufweisen. Da diese Größenheterogenität auch bei den im Projekt betrachteten Modellen vorlag (hervorgerufen durch den hohen Detaillierungsgrad des deutschen Energiesystems im Vergleich zur relativ weniger detaillierten Darstellung der Nachbarländer), wurde die asynchrone Methode zusätzlich zu den anderen ADMM-Teilverfahren implementiert

Mit MIGRA-NEST [1] wurde ein Instrument geschaffen, das es ermöglicht regionale Energiesystemmodelle in den globalen Kontext zu stellen. Dabei ist ein schneller Einstieg durch einen Rapid Prototyper möglich. Dessen Hauptmerkmal ist, dass es ermöglicht, vorhandene Modellkalibrierungen für die Erstellung von Prototypen nationaler Einzelmodelle zu nutzen. Anschließend kann das regionale Modell durch zusätzliche Detaillierung verfeinert und Szenarien erstellt werden. Bei

der Berechnung von Modellergebnissen können Parameter des übergeordneten Modells übernommen und Ergebnisse an dieses übergeben werden.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

- Dissertation von Clara Orthofer: "MIGRA-NEST: Mixed Granularity Nested Energy System Toolbox Evaluating National Energy Transition Pathways under Global Greenhouse Gas Emission Budgets: A Case Study on South Africa" [1]
- Beiträge zur Webseite zu den eXtremOS Projektergebnissen der FfE [2]
- Konferenzbeitrag "A Comparative Study of Benders Decomposition and ADMM for Decentralized Optimal Power Flow," [3]
- Konferenzbeitrag "Meta-analysis of country-specific energy scenario studies for neighbouring countries of Germany." [4]
- Vortragsreihe (MOOC) zur Dekompositionsmethoden in der Energiesystemmodellierung (englisch) [5]
- GitHub-Repository der ADMM-MATLAB-Schnittstelle („admMATLAB“) [6]
- GitHub-Repository der asynchronen ADMM-Implementierung auf dem urbs-Framework [7]

Folgende Veröffentlichung ist noch geplant:

- Dissertation von Soner Candas (geplant 2022)

Quellenverzeichnis

- [1] C. Orthofer: **MIGRA-NEST: Mixed Granularity Nested Energy System Toolbox Evaluating National Energy Transition Pathways under Global Greenhouse Gas Emission Budgets: A Case Study on South Africa**. Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Technischen Universität München; 2020; <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1596161>
- [2] C. Fiedler, A. Guminski, S. Kigle, T. Kern, C. Orthofer, S. Candas, et. al: **Webseite der eXTREMOS Projektergebnisse – www.extremos.ffe.de**
- [3] S. Candas, K. Zhang and T. Hamacher: **A Comparative Study of Benders Decomposition and ADMM for Decentralized Optimal Power Flow**. In *2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGT45199.2020.9087777.
- [4] S. Candas, A. Guminski, C. Fiedler, C. Pellingner, C. Orthofer: **Meta-analysis of country-specific energy scenario studies for neighbouring countries of Germany**. In 16th IAEE European Conference, 2019; https://iaee2019ljubljana.oyco.eu/download/contribution/fullpaper/84/84_fullpaper_20190607_144407.pdf
- [5] S. Candas, T. Hamacher: **MOOC Decomposition Methods in Energy System Modelling**: <https://www.ei.tum.de/ens/research/projects/finished-projects/extremos/mooc-decomposition-methods-in-energy-system-modelling>
- [6] S. Candas: **admMATLAB - MATLAB interface for decomposed optimization of any linear optimization problems**: <https://github.com/tum-ens/admmatlab>
- [7] S. Candas, J. Dorfner **eXtremOS – urbs**: <https://github.com/tum-ens/urbs/tree/extremos>
- [8] T. Zipperle, C. Orthofer: **Same Same but Different? - Machine Learning Algorithmen zur Indikatoren basierten Regionenbildung**. In 11. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 2019; <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1536002/1536002.pdf>
- [9] C.Orthofer: **MESSAGEix South Africa Github Repository**. https://github.com/tum-ewk/message_ix_south_africa
- [10] S. Candas, J. Dorfner **urbs** <https://github.com/tum-ens/urbs>
- [11] S. Candas: **Deep-dive report: Potentials and challenges of decomposition methods in energy system modelling**. URL: <https://extremos.ffe.de/pdf/Potentials%20and%20Challenges%20of%20Decomposition%20Methods%20in%20Energy%20System%20Modelling.pdf>; 2020
- [12] W.-R. Poganietz, D. François: **Descriptors and trends used in the project eXtremOS for the development of context scenarios**. KIT-ITAS; <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000119610>; 2020

- [13] S. Fattler, J. Conrad, A. Regett, C. Orthofer, et.al.: **Dynamis: Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems**. Abschlussbericht. https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2019/11/Dynamis_Hauptbericht.pdf, 2019