

nordwest2050

Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse
in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten

26. WERKSTATTBERICHT

Januar 2014

Zusammenfassung des Ansatzes, Ablaufs und der Resultate der Dynamischen Modellierung im Rahmen von 'nordwest2050'

Matthias Ruth, Onur Özgün, Jakob Wachsmuth

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Impressum

Herausgeber des Werkstattberichts:

artec | Forschungszentrum Nachhaltigkeit
Universität Bremen
Enrique-Schmidt-Str.7
28359 Bremen

Kontakt:

Matthias Ruth (Northeastern University, Boston, MA)
E-Mail: m.ruth@neu.edu

Onur Özgün (Northeastern University, Boston, MA)
E-Mail: o.ozgun@neu.edu

Jakob Wachsmuth Universität Bremen
E-Mail: wachsmuth@uni-bremen.de, Tel.: (0421) 218-64889

Weitere Mitwirkende

Stefan Gößling-Reisemann (Universität Bremen), Rebecca Gasper (University of Maryland) und Nana Karlstetter (Universität Oldenburg),

Die vorliegende Publikation wurde im Rahmen des Forschungsverbundes „nordwest2050 – Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten“ erstellt. Für den Inhalt sind die genannten Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Zitiervorschlag: Ruth, Matthias; Özgün, Onur; Wachsmuth, Jakob (2014) Zusammenfassung des Ansatzes, Ablaufs und der Resultate der Dynamischen Modellierung im Rahmen von 'nordwest2050'. nordwest2050-Werkstattbericht Nr.26. Universität Bremen: Bremen

Diese Publikation ist im Internet als pdf-Datei abrufbar unter: www.nordwest2050.de.

Bremen, 09.01.2014

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Dynamische Modellierung	1
2.	Das ‚nordwest2050‘-Modell	2
2.1	Modellstruktur	2
2.2	Schnittstelle für Benutzerinnen und Benutzer	4
2.3	Rahmenszenarien	9
3.	Modelleinsatz und -auswertung	11
3.1	Input von Fachleuten und Interessenvertretenden	11
3.1.1	Kostenorientierte Strategie	12
3.1.2	Emissionsorientierte Strategie	12
3.1.3	Stromnachfrageentwicklung	13
3.2	Ergebnisse der Auswertung	13
4.	Literaturverzeichnis	20

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Realität und Modellwelt	2
Abb. 2: Modellstruktur	3
Abb. 3: Exemplarische Input-Seite für die Wahl von Rahmenszenarien	5
Abb. 4: Exemplarische Input-Seite für die Wahl neuer Kapazitäten für die Elektrizitätserzeugung	6
Abb. 5: Exemplarische Output-Seite mit Zeitreihen	7
Abb. 6: Exemplarische Output-Seite mit Landkarte und Datenfeldern	8
Abb. 7: Konfliktlösungsmodul	9
Abb. 8: Kumulative Kosten für Ausbau und Wartung der Energiegewinnung	14
Abb. 9: Stromgestehungskosten pro MWh-Elektrizität	14
Abb. 10: Kumulative CO ₂ -Emissionen der Stromproduktion	15
Abb. 11: CO ₂ -Emissionen pro MWh-Elektrizität	15
Abb. 12: Flächenverbrauch für Biomasse in Hektar	16
Abb. 13: Stickstoffbelastung pro landwirtschaftliche Fläche	16
Abb. 14: Verteilung kumulativer Kosten (Milliarden Euro) und kumulativem CO ₂ Ausstoß (Millionen Tonnen) für zwei Strategien und unter allen Szenarien.	17
Abb. 15: Kumulative CO ₂ Emissionen unter historischer und beschleunigter Nachfrageentwicklung, mit und ohne Klimawandel	18
Abb. 16: Kumulative Kosten unter historischer und beschleunigter Nachfrageentwicklung, mit und ohne Klimawandel	19

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht der Treiberausprägungen in den drei Rahmenszenarien	10
---	----

Abkürzungsverzeichnis

EE	Erneuerbare Energien
GuD-Kraftwerke	Gas-und-Dampf-Kraftwerke
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung

1. Einführung

Dieses Dokument bietet eine kurze Zusammenfassung des 'nordwest2050'-Modells, seiner Anwendung, sowie exemplarische Illustrationen von Modellresultaten und Einsichten, die aus diesen abgeleitet werden können. Eine ausführliche Beschreibung des Modells und eine detaillierte Diskussion von Modellszenarien und den ihnen zugeordneten Strategien sowie deren Resultate befinden sich in [Ruth et al].

1.1 *Motivation*

Eine mögliche Anpassung an den Klimawandel erfordert Wissen über potentielle technische, soziale, ökonomische und ökologische Rahmenbedingungen in der Zukunft. Das Wechselspiel all dieser Bedingungen, deren Evolution und deren Verhältnis zur Gegenwart erschweren es häufig, heute Entscheidungen vorzubereiten oder zu treffen, die zukünftig wünschenswerte Resultate hervorbringen. Die Entscheidungsfindung wird darüber hinaus dadurch erschwert, dass zukünftige Rahmenbedingungen ungewiss sind, und sich Einzelentscheidungen auf das Gesamtsystem – wie zum Beispiel eine gesamte Wirtschaftsbranche oder Region – auswirken. „Optimale“ Strategien gibt es in solchen komplexen Situationen in der Regel nicht. Mit hinreichend gutem Verständnis der Sachverhalte und Wechselbeziehungen lassen sich aber Strategien finden, die für eine breite Menge von Entwicklungen zumindest als akzeptabel angesehen werden können.

1.2 *Dynamische Modellierung*

Dynamische Modellierung ist eine Vorgehensweise, die einzelne Sachverhalte komplexer Systeme miteinander in Beziehung setzt, deren potentielle Entwicklungen aufzeigt und damit eine Basis für die Analyse von Systeminterventionen bietet. In der Regel werden die Dynamiken einzelner Teilsysteme in mathematischer Form im Rahmen eines Computermodells dargestellt und miteinander in Verbindung gesetzt.

Von besonderem Interesse bei der dynamischen Modellierung im Rahmen von 'nordwest2050' sind Fragen, wie sich der Energiesektor (Strom-, Fern- und Nahwärmeversorgung) und die Nahrungsmittelwirtschaft (Landwirtschaft und Tierzucht) unter alternativen Klimabedingungen entwickeln und wie sich diese Entwicklungen gegenseitig beeinflussen. Zum Beispiel können die Änderungen in Produktmengen und der Zusammensetzung der Nahrungsmittelwirtschaft Auswirkungen auf die Landnutzung haben und Änderungen der Energie- und Wasserbedarfe des Sektors für Produktion, Verarbeitung und Kühlung veranlassen. Landnutzung und Viehbestände wiederum beeinflussen Erträge von Energiepflanzen, Mist, Gülle und anderen Bestandteilen von Biogasanlagen. Da Anpassungen innerhalb eines Teilsystems, wie einer Branche oder eines Produktionssystems, nicht spontan vorgenommen werden können, sondern Zeit benötigen – Zeit, in der sich die Rahmenbedingungen für einzelne Entscheidungen ändern können – ergibt sich ein nicht oder nur schwer vorhersagbares, komplexes Modellverhalten. Die Möglichkeit mit einem Modell zu „spielen“, das ein solches komplexes Verhalten aufzeigt, ermöglicht es Erfahrungen zu sammeln, um das Gesamtsystem und seine Einzelteile und Wechselwirkungen besser zu verstehen. Ziel der dynamischen Modellierung ist es nicht nur die zeitlich variierenden Systemabläufe zu beschreiben, sondern interaktives Umgehen und Lernen mit Modellen zu ermöglichen.

2. Das ‚nordwest2050‘-Modell

Bei der Erstellung des ‚nordwest2050‘-Modells hat sich das Team aufgrund der bestehenden Datenlage und auf der Basis intensiver Diskussionen mit Expertinnen und Experten in den einzelnen Teilsystemen auf einen gewissen Abstraktionsgrad geeinigt (Abbildung 1). Ziel des Modells ist es daher nicht, die Gesamtregion in hoher geographischer Auflösung darzustellen, sondern lediglich die einzelnen Landkreise zu repräsentieren. Für Sachverhältnisse innerhalb der Landkreise – und innerhalb des Energie- und Lebensmittelsektors in den elf Landkreisen und fünf Städten der Metropolregion – sowie landkreisübergordnete Entwicklungen beinhaltet das Modell nur die Informationen, welche von den einbezogenen Fachleuten als wichtig angesehen wurden, nicht also alle potentiell relevanten Informationen des ‚nordwest2050‘-Projektes.

Realität	Modell Welt
<ul style="list-style-type: none"> • Firmen-spezifisches Wissen und Interessen • Einzelentscheidung über Technologien und Wertschöpfungsketten • Kurz- und mittelfristige Investitionsziele und -entscheidungen • Beschränkter Einfluss auf regionale Ergebnisse • Klima als einer von vielen Parametern für Entscheidungsfindung 	<ul style="list-style-type: none"> • Aggregierte Sicht auf Sektoren und die Region • Kollektive Resultate von Einzelentscheidungen • Langfristige Entwicklungspfade für Sektoren und die Region • Klima als zusätzlicher Stressfaktor der sektorales und regionales Handeln beeinflusst

Abbildung 1: Realität und Modellwelt

Die zeitliche Auflösung des Modells ist in monatlichen Zeitschritten, um zum Beispiel saisonale Hitze- und Kälteperioden in genügendem Detail abzubilden und die damit verbundenen Entscheidungen im Energie- und Lebensmittelsektor zu erfassen. Der Modellanfang ist im Jahre 2010, von dem ab sich bereits ergebene Entwicklungen bis in die Gegenwart abspielen. Von 2013 an können Modellbenutzerinnen und Modellbenutzer dann neue Entscheidungen treffen und deren Auswirkungen am Modell bis 2050 erproben.

Das Modell selbst ist nicht als Optimierungsmodell ausgelegt, in dem Verhaltensweisen der einzelnen Akteure vordefiniert wurden und dann aufgrund dieser Verhaltensannahmen und Rahmenbedingungen Idealstrategien identifiziert werden. Wie oben angedeutet hat ein solcher Ansatz wenig Sinn. Daher ist das Modell eher als ein „Spiel“ zu verstehen, mit dem Akteure interaktiv umgehen: Entscheidungen einspeisen, Resultate sehen und neue Entscheidungen finden. Mehrfache Wiederholung des Spiels unter sich ändernden Rahmenbedingungen ermöglicht dann, ein besseres Verständnis der systemischen Zusammenhänge in der Region zu erlangen und so Entscheidungen zu identifizieren, die vielen unterschiedlichen potentiellen Zukünften gerecht werden.

2.1 Modellstruktur

Die Struktur des dynamischen Modells und seiner wesentlichen Bestandteile ist in Abbildung 2 und der damit verbundene Bedarf für Wohnfläche (Einfluss 1 in Abbildung 2) dargestellt. Das

Modell beinhaltet in seinem inneren Kern Änderungen in der Bevölkerungsgröße und Räume (Einfluss 4), Elektrizitätserzeugung und Import/Export, sowie Landwirtschaft und Lebensmittelerzeugung, sowie die Flächen die für Landwirtschaft und Naturräume zur Verfügung stehen (Einfluss 8). Von außen machen sich auf diese Dynamiken der Klimawandel und andere externe Treiber bemerkbar (Einflüsse 9-14). Diese externen Einflüsse sind im Modell als Rahmenszenarien eingebunden, die unten näher beschrieben sind.

Das Bevölkerungsmodul und das Landwirtschafts- und Lebensmittelerzeugungsmodul beeinflussen über ihren Bedarf nach Strom, Wärme und Kälte den Energiesektor sowie die Elektrizitätsimporte und –exporte (Einflüsse 6 und 7) der Region. Innerhalb des Energiemoduls werden zwölf verschiedene Energiewandlungstechnologien unterschieden, die wiederum feiner untergliedert sind, wie zum Beispiel Biogasanlagen, für die Anteile von Gärresten explizit spezifiziert werden können, um alternative Verfahren darzustellen. Für bestehende Kraftwerke sind ihre Standorte, Kapazitäten, Energiequellen, planmäßige Stilllegung und andere technische Details im Modell aufgenommen. Das Portfolio von Technologien beinhaltet Photovoltaikanlagen, Solarthermieheizwerke, Gasturbinen, mit Erdöl betriebene Kraftwerke, Müllverbrennungsanlagen, konventionelle und innovative (mit Gärresten feuerbare) Biogasanlagen, Kernkraftwerke, Wasserkraftwerke, Gas-und-Dampf-Kraftwerke, sowie Kohlekraftwerke und Windenergieanlagen. Im Landwirtschafts- und Lebensmittelmodul werden fünf verschiedene Ertragsarten unterschieden (Mais, Weizen, Gerste, Roggen, Kartoffeln und andere Wurzelgemüse), sowie vier verschiedenen Nutztierarten – Rinder (für Milch und für Fleisch), Schweine, Geflügel, und Fisch.

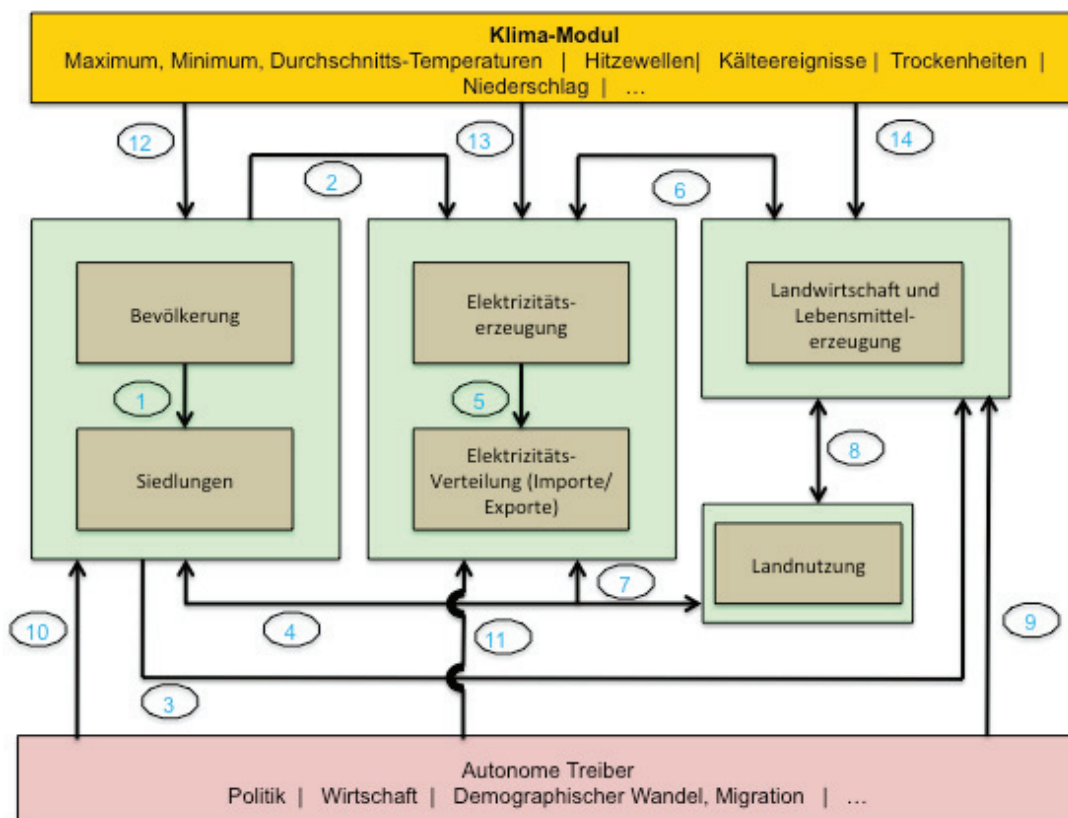


Abbildung 2: Modellstruktur

2.2 Schnittstelle für Benutzerinnen und Benutzer

Modellnutzende können über eine Reihe von Seiten auf dem Bildschirm zwischen verschiedenen Rahmenszenarien und Einflussgrößen wählen. Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen Beispiele solcher Input-Seiten. Die Ergebnisse des Modells werden schon während der Laufzeit auf eigenen Seiten dargestellt. Dabei kann das Modell beliebig angehalten werden, um neue Entscheidungen zu treffen und Resultate zu analysieren. Die Outputs sind zum Beispiel als Zeitreihen oder Landkarten mit entsprechenden Datenfeldern und Legenden verfügbar. Beispiele dafür sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 gegeben.

nordwest2050

Framing Scenario Settings (Page 1/3)

Jump To Run Control
To Page 2

Scenario A: World of Regions
 Szenario A: Regionalisierte Welt

Scenario B: Sustainable Globalization
 Szenario B: Nachhaltige Globalisierung

Scenario C: Globalization without Limits
 Szenario C: Ungebremste Globalisierung

Migration Scenario:

Pessimistic (Off)
 Optimistic (On)

CO2 emission certificate price Scenario:

Slider: 1 — 2 — 3

Climate Scenario

0: No Change (not a realistic scenario. Included to identify the climate impacts more clearly)
 1: Weaker Change (No extreme events)
 2: Stronger Change (Extreme events)

Slider: 1 — 2

Yearly percent incr in Power Outages:

Slider: 0 — 5

Living Space Change Scenario:

Slider: 0 — 1 — 2

Investment Cost Scenario:

Slider: 1 — 2 — 3

Climate Model

CLM REMO

Avg Duration of Power Outages of Large Power Plants [hr]:

Graph: 200 — 0 (2010 - 2050)

Insulation Scenario:

Slider: 1 — 2 — 3

Seed Switch

The seed switch allows the user to select whether a 'seed' is used in random distributions. If the switch is green then the random number generated will remain consistent across each model run.

Building Temperature Reduction Scenario:

Slider: -2 — 0 — 2

Organic Land Growth

Use this slider to specify the monthly growth rate of organic land. The initial amount of organic land is 3% of total agricultural land.

Slider: 0.000 — 0.010 (0.002)

Avg Duration of Power Outages of Small Power Plants [hr]:

Graph: 200 — 0 (2010 - 2050)

Optimistic Solar Efficiency Increase (On) or Pessimistic Solar Efficiency Increase (Off) Switch

Solar Contract (On) or Lifetime (Off) Switch

Abbildung 3: Exemplarische Input-Seite für die Wahl von Rahmenszenarien

nordwest2050

Current Year, Month
2050. 12

Open New Power Plant

Back to Parameters

1. Select Location:

Bring the slider to the corresponding number of the location in the following list:

1. LK Friesland
2. LK Ammerland
3. Stadt Wilhelmshaven
4. LK Cloppenburg
5. Stadt Oldenburg
6. LK Wesermarsch
7. Stadt Bremerhaven
8. LK Cuxhaven
9. LK Vechta
10. LK Oldenburg
11. Stadt Delmenhorst
12. Stadt Bremen
13. LK Osterholz
14. LK Diepholz
15. LK Verden
16. LK Osnabruck

or..

Build solar/wind at all locations with capacity distributed equally to the counties

2. Select Electricity Capacity (MW):

To check existing capacities by location:

Wind Potential & Capacity by Location

Biomass Potential & Capacity by Location

Thermal Capacity by Location

3. Select Power plant type and type-specific options:

1. Solar thermal plant
2. Natural gas fired power plant
3. Oil fired power plant
4. Household waste fired plant
5. Solar power plant
6. Innovative biogas plant
7. Nuclear power plant
8. Hydropower plant
9. Combined Cycle power plant
10. Hard coal fired power plant
11. Conventional biogas plant
12. Wind

Type-specific options:

District Heating Option for thermal power plants (1,2,3,4,6,9,11) in the cities (3,5,7,11,12)

For Conventional Biogas (11):
The percentage of energy output supplied from crops (the rest will come from manure):

The percentage of crops cannot exceed 92% according to current legislation

For Innovative Biogas (6):
The percentage of energy output supplied from crops (the rest will come from digestate):

The percentage of crops should be between 25% and 82%

4: Go back to Run Control to Continue Run with New Plant Added

Basic Indicators

Energy-Related Indicators

Time Behaviors of Energy-Related Indicators by Type

Electricity and Heating Capacity by Location

Energy Demand Indicators

Food & Ag Indicators

Land Use by County

Sustainability Indicators

Climate Indicators

Abbildung 4: Exemplarische Input-Seite für die Wahl neuer Kapazitäten für die Elektrizitätserzeugung

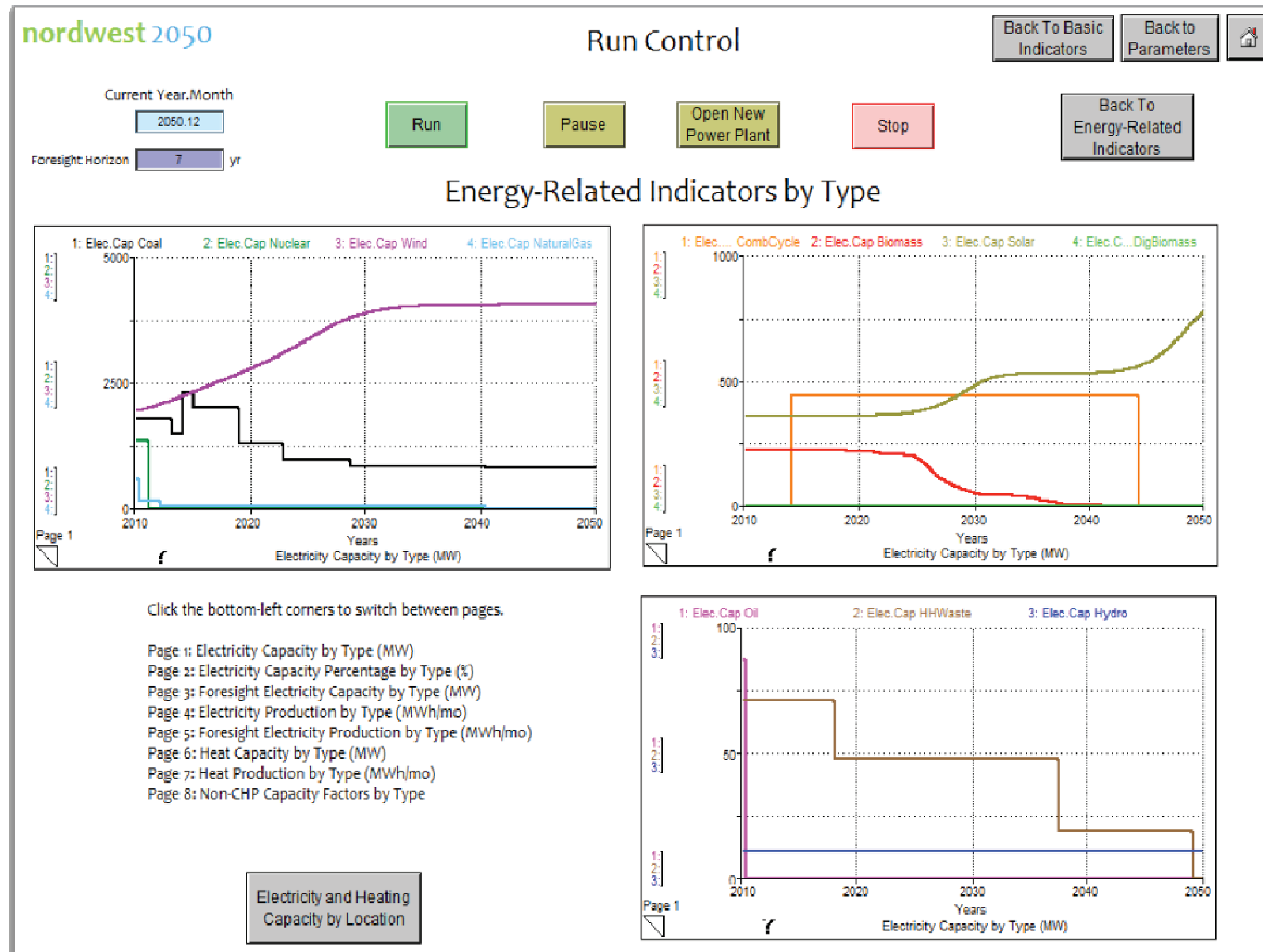


Abbildung 5: Exemplarische Output-Seite mit Zeitreihen

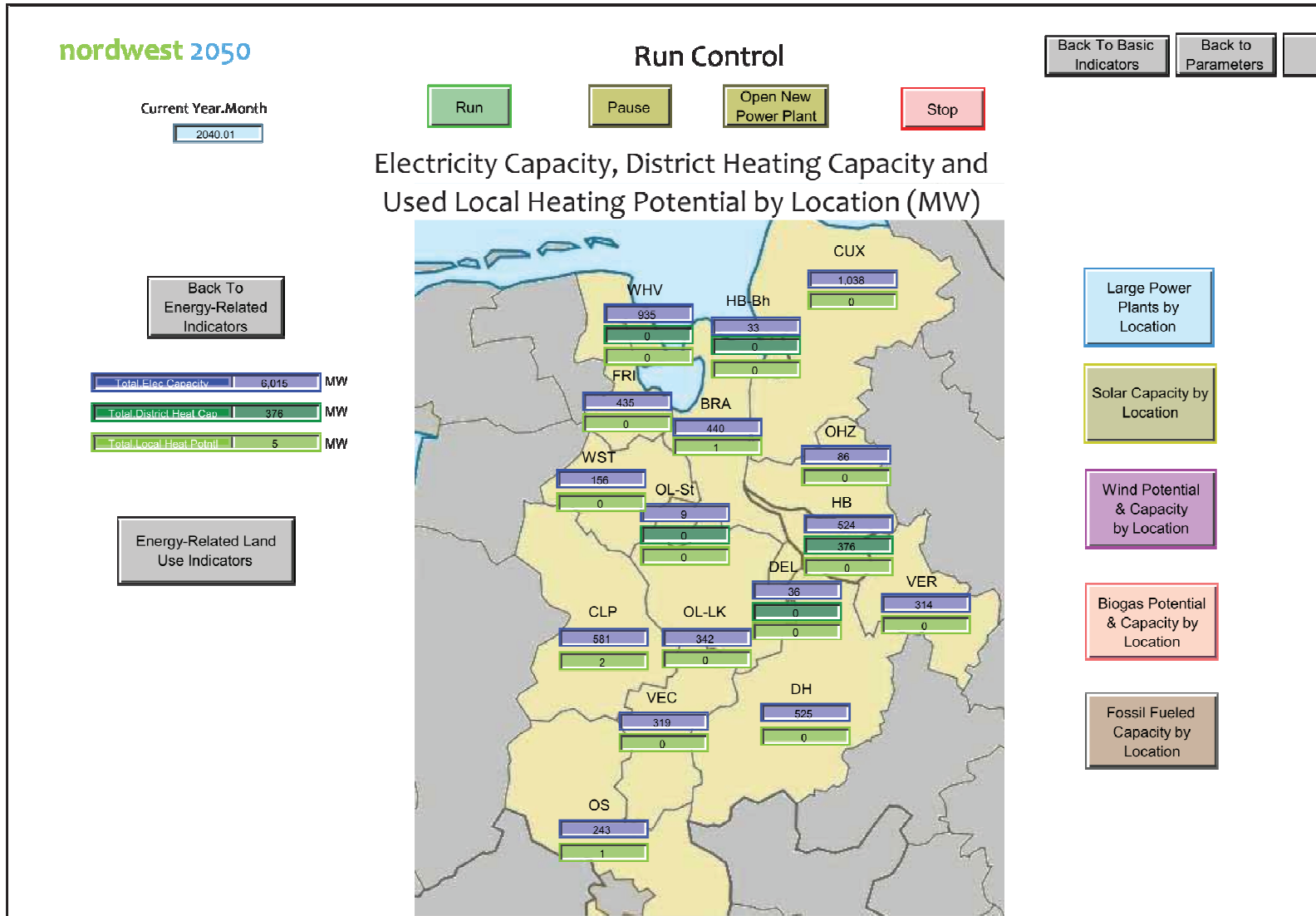


Abbildung 6: Exemplarische Output-Seite mit Landkarte und Datenfeldern

Da es prinzipiell möglich ist, dass Modellnutzende Entscheidungen treffen, die sich miteinander oder mit regionalen Gegebenheiten nicht vereinbaren lassen, führt das Modell intern einen Konsistenztest durch. Wird etwa vorgeschlagen, eine Biogasanlage zu bauen, prüft das Modell die ausreichende Verfügbarkeit von Flächen zum Anbau von Energiepflanzen, hält im Konfliktfall an und fragt nach einer alternativen Spezifikation (z.B. eine andere Art von Kraftwerk oder einem anderen Standort), bevor es weiterlaufen kann. Gleichmaßen werden Konsistenztests durchgeführt, um sicherzustellen, dass genügend Fläche besonders für Wind- und Solaranlagen aber auch für Viehhaltung im landwirtschaftlichen Bereich, genügend Biomasse für Biogasanlagen oder genügend Kühlwasser zur Verfügung stehen. Eventuelle gesetzliche Einschränkungen wie zum Beispiel bei der Tierhaltung oder Flächennutzung werden nicht explizit im Modell abgebildet. Diese waren aber wesentlicher Teil der Diskussionen in den Stakeholdergruppen, die mit dem Modell gearbeitet haben, und wurden über die entsprechenden Parametereinstellungen im Modell implizit berücksichtigt, während die Anwenderinnen und Anwender ihre Handlungsentscheidungen im Modell trafen. Eine Skizze des Konsistenztests und der damit verbundenen Konfliktlösung im Modell ist in Abbildung 7 dargestellt.

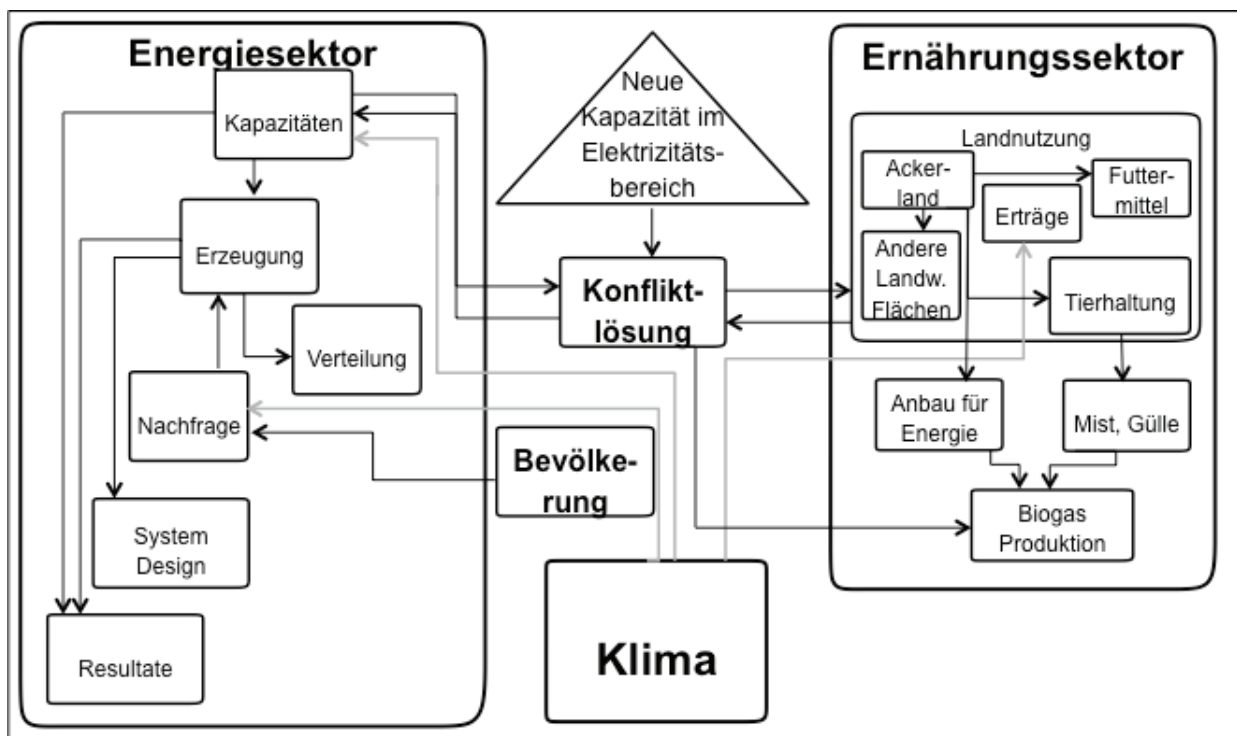


Abbildung 7: Konfliktlösungsmodul

2.3 Rahmenszenarien

Die Rahmenszenarien bilden die ‚Leitplanken‘ möglicher Entwicklungen für den Energie- und den Lebensmittelsektor. Nur unter plausiblen Vorgaben dieser Leitplanken lassen sich Handlungspfade in den einzelnen Sektoren integrieren. Zum Erstellen der Rahmenszenarien wurden in den Sektoren die jeweils wichtigsten Einflussfaktoren gemeinsam mit regionalen Akteurinnen und Akteuren identifiziert. In einem sektorübergreifenden Workshop wurden die Abhängigkeiten zwischen diesen Einflussfaktoren untersucht und in einem Diskussionsprozess zu drei in sich konsistenten Szenarien für das Jahr 2050 zusammengeführt (siehe Tabelle 1). Die Einzelheiten dieses Prozesses sind in [Wachsmuth 2013] beschrieben.

Die Rahmenszenarien wurden anschließend in teils qualitative, teils quantitative Annahmen an die entsprechenden Parameter im Modell übersetzt. Nähere Einzelheiten dazu finden sich in [Ruth et al].

Tabelle 1: Übersicht der Treiberausprägungen in den drei Rahmenszenarien

Treiber	Szenario 1 „Regionalisierte Welt“	Szenario 2 „Nachhaltige Globalisierung“	Szenario 3 „Ungebremste Globalisierung“
Grad der Handelsliberalisierung			
Entwicklung der Finanzmärkte	Stabilisierung	Destabilisierung	Destabilisierung
Güterverkehrsaufkommen			
Schleichender Klimawandel			
Extremwetterereignisse			
Tiefgreifender Wertewandel	Individualorientierung	Gemeinwohlorientierung	Individualorientierung
Demographischer Wandel	Abmilderung	Abmilderung	Verschärfung
Energiesektor			
Brennstoffpreise (Steinkohle, Erdgas, Heizöl)			
Förderung EE & KWK (Bund/EU)			
CO ₂ -Zertifikat-Preise			
Übertragungsnetzausbau			
Netzregulation	Verschärfung	Lockerung	Lockerung
Technologische Entwicklung: Speicher & Photovoltaik			
Offshore-Ausbau			
Legende:	/ : Mögliche Chance/Risiko für regionale Entwicklung, : Nicht eindeutig bewertbar Zunahme, Beschleunigung Abnahme, Verlangsamung Konstanz, Trenderhalt		

3. Modelleinsatz und -auswertung

3.1 Input von Fachleuten und Interessenvertretenden

Das Modell wurde im Verlauf von ca. vier Jahren und auf der Basis von Gesprächen und Workshops mit Fachleuten¹ sowie ausgiebigen Modelltests erstellt. Daten für die einzelnen Modellgrößen und Zusammenhänge wurden aus der Fachliteratur, Berichten, sowie anderen Modellen übernommen und mit Einschätzungen und Annahmen von Expertinnen und Experten ergänzt. Details über die jeweiligen Hypothesen, Datenquellen und Modellspezifikationen finden sich in [Ruth et al].

Die Modellentwicklung konzentrierte sich in den ersten Jahren auf die einzelnen Bestandteile und deren Verknüpfung. Daher war die Einbindung von Expertinnen und Experten bis dahin auf die relevanten Details konzentriert. Im Verlauf änderte sich dann der Fokus auf das Gesamtsystem und die Gesamtregion. Das Gesamtmodell wurde im Juni 2013 erstmals einer aus dem Energie- und dem Ernährungssektor sowie der Raumplanung zusammengesetzten Gruppe von Interessenvertretenden² vorgeführt. Diese nutzen das Modell, um unter verschiedenen Rahmenbedingungen Entscheidungen im Energie- und Ernährungssektor zu treffen.

Zwei voneinander getrennte Gruppen arbeiteten und experimentierten im Verlauf eines Tages mit dem Modell. Während der Pausen zwischen den Modellläufen wurden Erfahrungen ausgetauscht. Wenngleich die Zusammensetzung der Gruppen und die Rahmenszenarien, unter denen sie Entscheidungen zu treffen hatten, unterschiedlich waren, haben sich dennoch gemeinsame Perspektiven und Strategien herauskristallisiert. Neben den Strategien, die die Beteiligten wählten, und den Einsichten, die sie aus den Modellläufen ableiteten, ergab sich aus diesem Workshop eine allgemeine Bestätigung des Wertes des Modells für die Erfassung komplexer Dynamiken, mit denen sich die Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten im Verlaufe der nächsten Jahre auseinandersetzen hat.

Die Erfahrungen vom Workshop bereiteten eine Basis für tiefer gehende Analysen des Systemverhaltens und der entsprechenden Interventionsmöglichkeiten. Aus den Anforderungen der verschiedenen Interessenvertretenden wurde eine Reihe von als notwendig angesehenen Randbedingungen regionaler Entwicklungsstrategien abgeleitet. Dazu gehören

- die Deckung des regionalen Strombedarfs durch die Erzeugung in der Region,
- den Erhalt der Fernwärmeinfrastruktur und der Weiterbetrieb bestehender Anlagen und Infrastrukturen mindestens bis zu ihrer Refinanzierung,
- das Anstreben einer Versorgung mit Elektrizität zu 100% aus Erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen,
- der Verzicht auf Nuklearenergie,

¹ Beteiligte Expertinnen und Experten waren u.a.: Jens Birk (Statistisches Landesamt Bremen), Julian Helmich (REON AG), Karin Jahn (ehem. Bremer Energie Institut), Michael Pelzl (energiekonsens), Ulrich Scheele (ARSU GmbH), Wolfgang Schulz (ehem. Bremer Energie Institut), Rainer Schütte (ehem. Landwirtschaftskammer Niedersachsen), Manfred Zolper (swb AG). Die Verantwortung für die im Endeffekt getroffenen Modellannahmen obliegt jedoch einzig den Autoren dieses Berichts.

² Am Workshop nahmen teil: Bernd Hadler (Landwirt), Ulrich Hausner (WTSH GmbH), Helmut Honkomp (Energiewende Osterholz 2030), Matthias Kirk (ehem. Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten e.V.), Christoph Krieger (NieKE-Niedersächsisches Kompetenzzentrum Ernährungswirtschaft), Jürgen Müller (swb AG), Rainer Schütte (ehem. Landwirtschaftskammer Niedersachsen), Heinrich Siemering (Bioenergie Varel), Carola Skuppin (Kompetenznetzwerk Ernährung), Barbara Woltmann (ehem. Nds. Ministerium für Inneres und Sport, Regierungsvertretung Oldenburg). Die Ableitung der Randbedingungen und Strategien lag jedoch alleinig in der Verantwortung der Autoren dieses Berichts.

- ein Bestand an regelbarer Erzeugungsleistung zum Ausgleich der monatlichen Fluktuationen sowie
- die Reduktion des Flächenverbrauchs für Energiepflanzen und des Futtermittelimportbedarfs.

Davon ausgehend wurden zwei mögliche Strategien entwickelt, eine stärker kostenorientierte und eine stärker emissionsorientierte. Diese wurden so gestaltet, dass sie sich alle zehn Jahre an die Entwicklung des Verbrauchs und der weiteren Rahmenbedingungen anpassen.

3.1.1 Kostenorientierte Strategie

Eine kostenorientierte Strategie, welche die genannten Randbedingungen beachtet, ist folgende:

- Erhalt bestehender Kraftwerke bis zum Ende ihrer technischen Lebensdauer,
- Erneuerung von Müllheizkraftwerken, wenn diese in den Ruhestand gehen,
- Erneuerung von Fernwärmekapazitäten, so dass die Kapazität der Wärmeerzeugung nicht unter das Niveau von 2010 sinkt, bevorzugt als GuD-Kraftwerke,
- Erhöhung der installierten Photovoltaikkapazität auf das aktuelle Niveau von 1500 MW,
- Ausbau der Windkapazitäten, so dass jährliche Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien und KWK-Anlagen dem jährlichen Strombedarf nach 2040 entspricht,
- Bau von GuD- und Biogaskraftwerken, um die Sicherheit der Stromversorgung aufrecht zu erhalten,
- Verringerung des für Energiepflanzen genutzten Ackerlandes unter das Niveau von 2010 durch eine Verringerung der Biogaskapazität und / oder einen hohen Anteil von Gülle und Gärresten in neuen Biogasanlagen.

3.1.2 Emissionsorientierte Strategie

Für die genannten Randbedingungen wurde folgende emissionsorientierte Strategie entwickelt:

- Erhalt bestehender Kraftwerke bis zum Ende ihrer Amortisationsdauern,
- Erneuerung von Müllheizkraftwerken, wenn diese in den Ruhestand gehen,
- Erneuerung von Fernwärmekapazitäten, so dass die Kapazität der Wärmeerzeugung nicht unter das Niveau von 2010 sinkt, bevorzugt als Solarthermie- oder GuD-Anlagen,
- Ausbau der Wind- und Photovoltaikkapazitäten, so dass die Residuallast minimal ist (Anteil der Photovoltaik an der erneuerbaren Kapazität liegt bei ca. 43-48 %, siehe [Wachsmuth et al 2013]) und die Jahreserzeugung aus Erneuerbaren Energien und KWK-Anlagen dem jährlichen Strombedarf nach 2040 entspricht,
- Bau von GuD- und Biogaskraftwerken, um die Sicherheit der Stromversorgung aufrecht zu erhalten,
- Verringerung des für Energiepflanzen genutzten Ackerlandes unter das Niveau von 2010 durch eine Verringerung der Biogaskapazität und / oder einen hohen Anteil von Gülle und Gärresten in neuen Biogasanlagen.

3.1.3 Stromnachfrageentwicklung

Die Entwicklung der Stromnachfrage ist ein kritischer Parameter, der das Verhalten der meisten Variablen im Modell beeinflusst. Statt also für jedes der Rahmenszenarien oder die beiden Strategien eine Entwicklung der Stromnachfrage festzulegen, werden je zwei unterschiedliche Entwicklungen der Stromnachfrage pro Kopf auf der Grundlage unterschiedlicher Diffusionsgeschwindigkeiten von innovativen Technologien und Verhaltensweisen der Verbraucherinnen und Verbraucher betrachtet. Der historische Trend zeigt langsame technologische Effizienzgewinne und eine Zunahme der Stromnachfrage für Kühlzwecke. Alternativ dazu wird eine beschleunigte Verbreitung effizienter Technologien in allen Verbrauchssektoren betrachtet.

Die Entwicklung der Wärmenachfrage ist hingegen an die Rahmenszenarien, insbesondere den schleichenden Klimawandel, den demographischen Wandel und den Wertewandel, gekoppelt.

3.2 *Ergebnisse der Auswertung*

Abbildung 8 bis Abbildung 13 geben einen Überblick über die Entwicklungen der Kosten der Strom- und Fernwärmeversorgung, der strombezogenen CO₂-Emissionen, der zur Biogas-erzeugung genutzten Fläche, sowie der Stickstoffbelastung bis zum Jahr 2050 unter den verschiedenen Strategien und Szenarien. In diesen Grafiken finden sich die drei verschiedenen Rahmenszenarien – Regionalisierte Welt (A), Nachhaltige Globalisierung (B) und Ungebremste Globalisierung (C). Diese sind jeweils mit den folgenden Annahmen kombiniert:

- Emissionsorientierte Strategie bei historisch gegebener Stromnachfrageentwicklung,
- Emissionsorientierte Strategie bei beschleunigter Verminderung der Stromnachfrage,
- Kostenorientierte Strategie bei historisch gegebener Stromnachfrageentwicklung,
- Kostenorientierte Strategie bei beschleunigter Verminderung der Stromnachfrage.

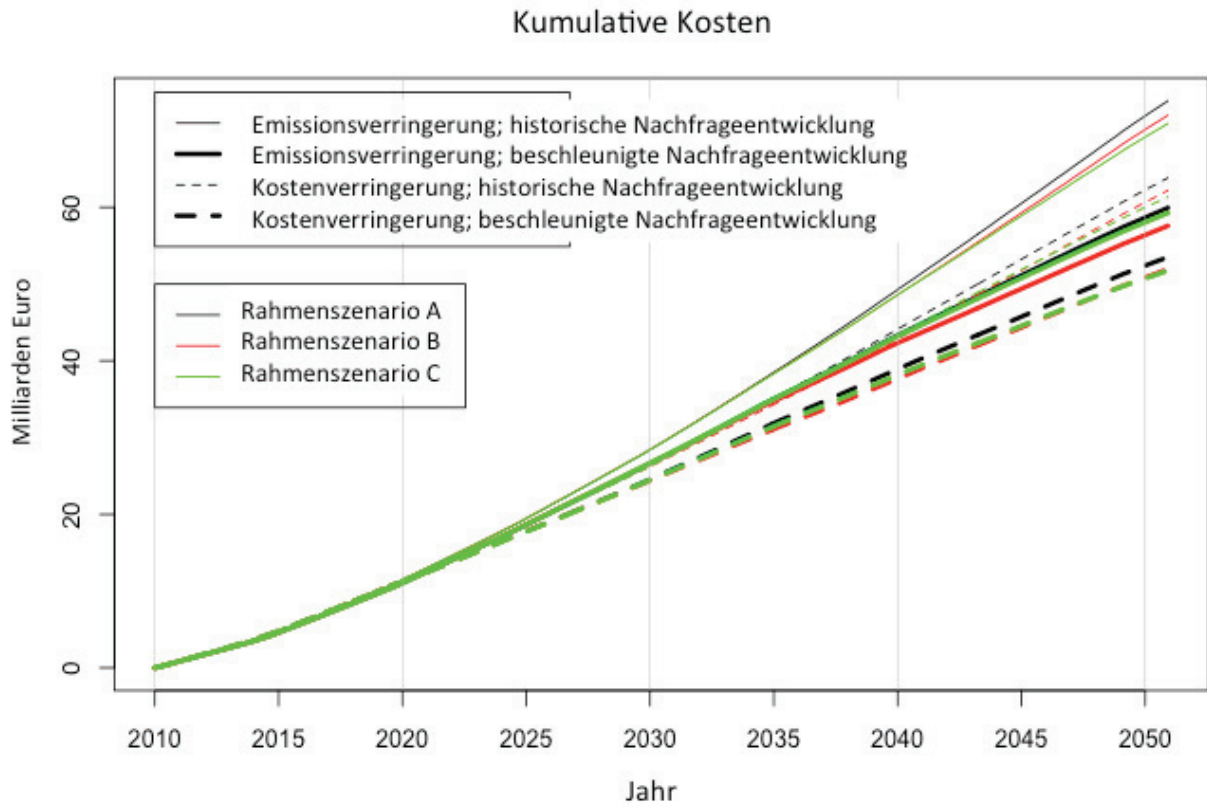


Abbildung 8: Kumulative Kosten für Ausbau und Wartung der Energiegewinnung

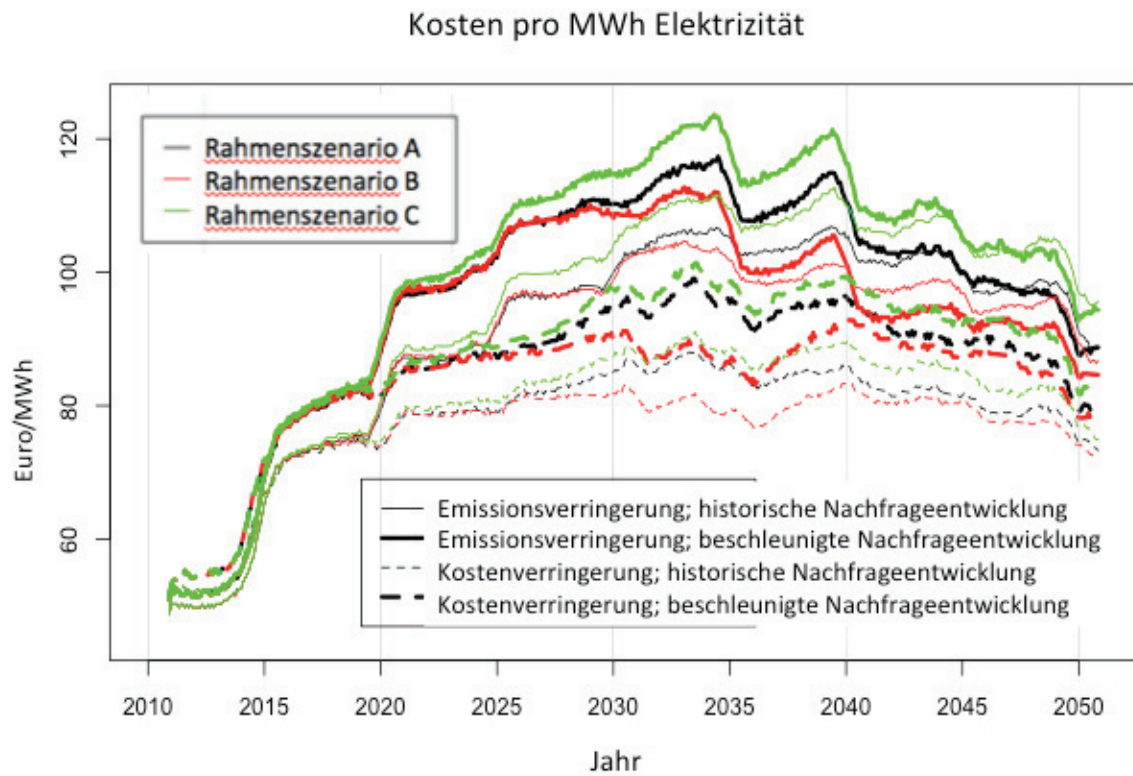
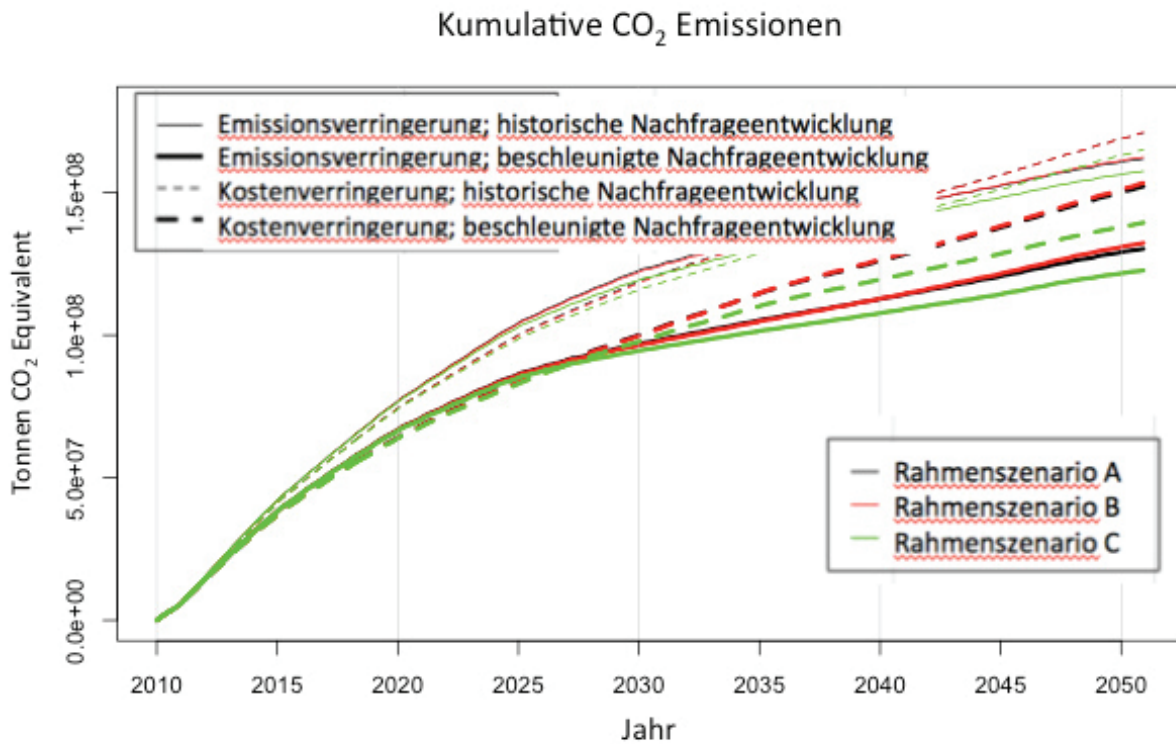
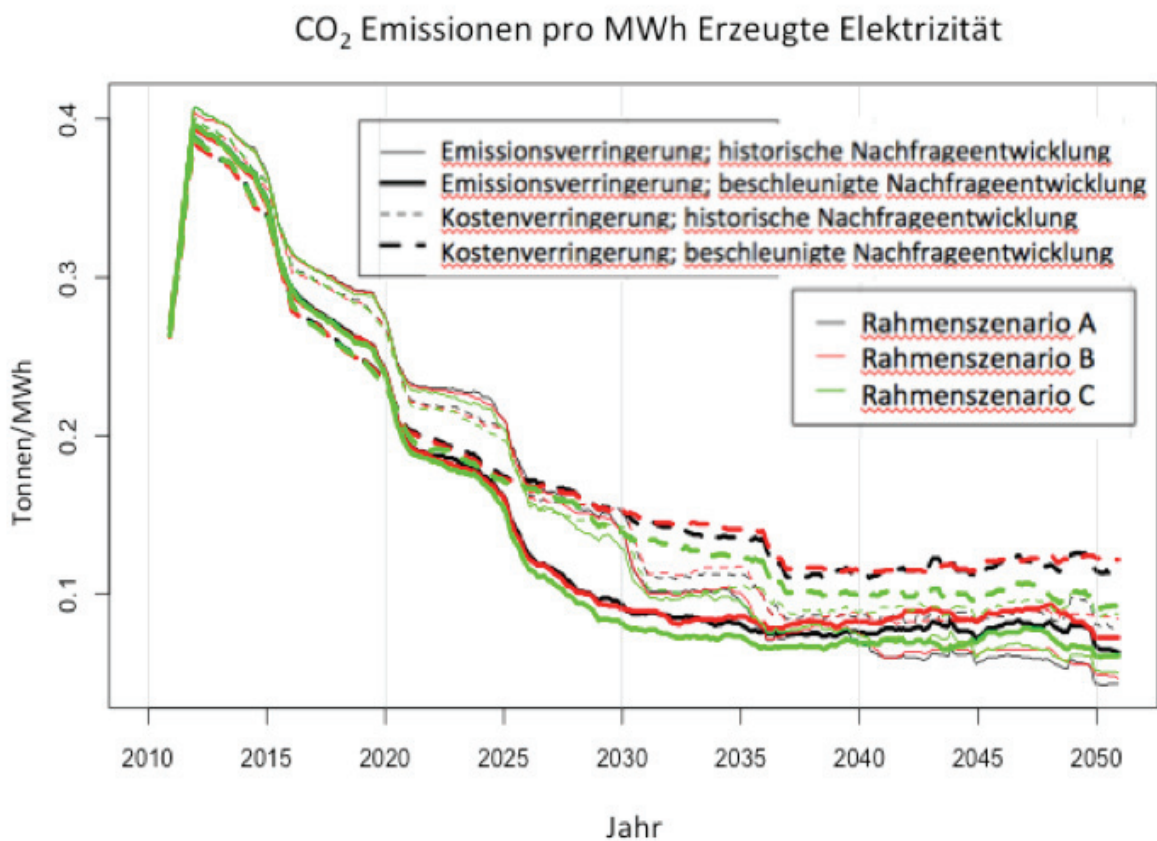


Abbildung 9: Stromgestehungskosten pro MWh-Elektrizität

Abbildung 10: Kumulative CO₂-Emissionen der StromproduktionAbbildung 11: CO₂-Emissionen pro MWh-Elektrizität

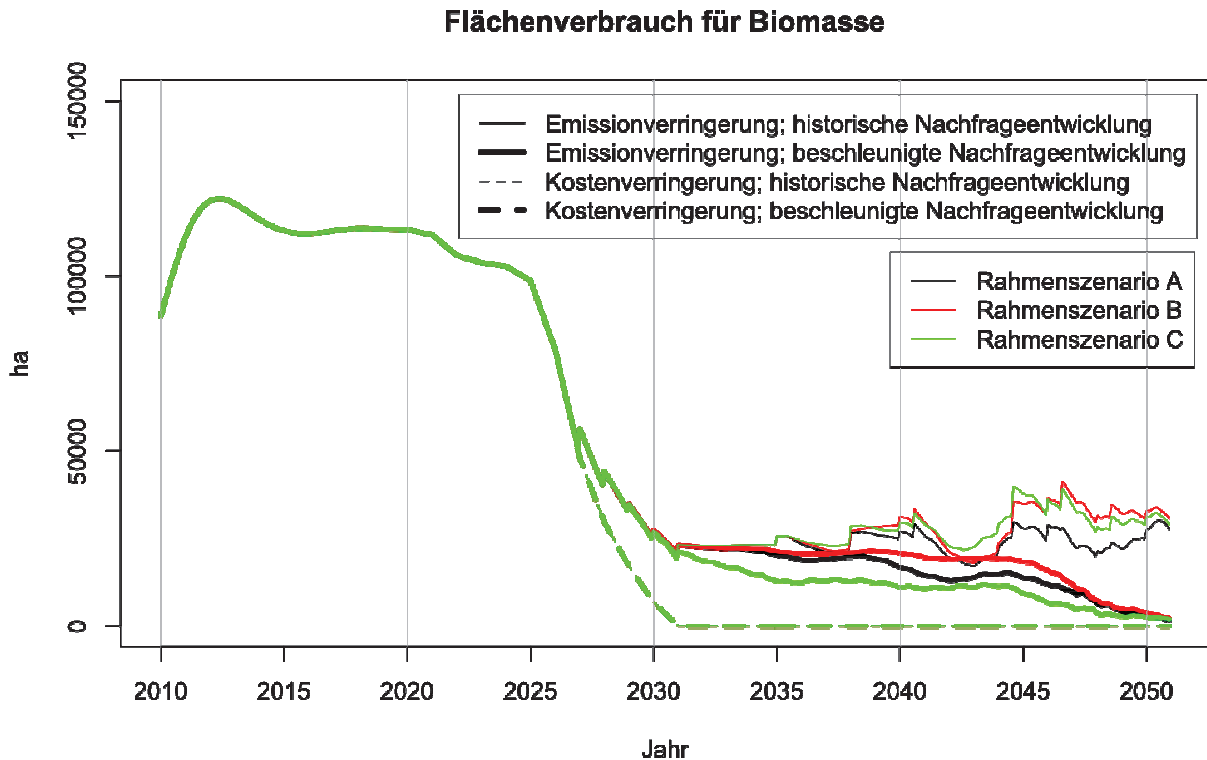


Abbildung 12: Flächenverbrauch für zur Biogaserzeugung genutzte Biomasse in Hektar

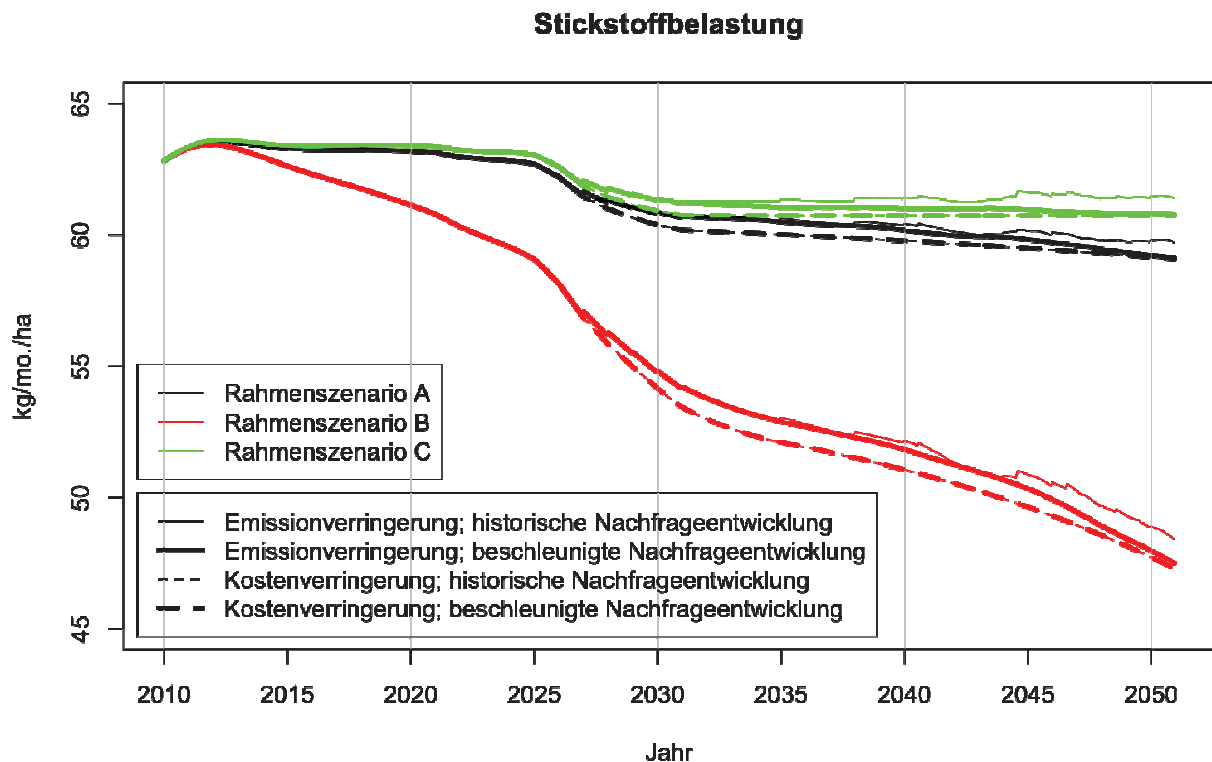


Abbildung 13: Stickstoffbelastung pro landwirtschaftliche Fläche

Wie sich aus diesen Resultaten klar ergibt, generieren die Entscheidungen unter den einzelnen Szenarien Kosten- und Emissionsentwicklungen, die in einer verhältnismäßig engen Bandbreite angesiedelt sind. Diese Entwicklungen werden generell durch eine Ausdehnung erneuerbarer

Energieträger möglich, während sich zugleich die Zuweisung von Flächen für Biomasse im Verlauf der Zeit hin zu Wind- und Solaranlagen verschiebt und in der Summe sogar verringert. Eine Selbstversorgung der Metropolregion mit Elektrizität in monatlicher Bilanz ist möglich aufgrund von Anpassungen der Kapazitätsfaktoren und Zuschaltung neuer Kapazitäten, sodass das regionale Angebot die regionale Nachfrage nach Elektrizität deckt. Eine monatlich gemittelte Selbstversorgung bedeutet allerdings nicht unbedingt, dass die Spitzennachfrage immer gedeckt werden kann, insbesondere nicht, wenn Speichermöglichkeiten unzureichend zur Verfügung stehen. Eine Anbindung an die überregionalen Übertragungsnetze bleibt daher stets notwendig.

Während für die kostenorientierte Strategie wie zu erwarten die Kosten pro erzeugter Strommenge stets geringer und die Emissionen pro erzeugter Strommenge stets höher sind, spielt für die kumulativen Kosten und Emissionen die Änderung des Verbrauchs die wichtigere Rolle (siehe Abbildung 14).

	Rahmenszenario A	Rahmenszenario B	Rahmenszenario C
Hist. Nachfrage	Kumulative Kosten 63.8 → 73.9	Kumulative Kosten 62.2 → 72.0	Kumulative Kosten 61.4 → 70.9
	Kumulative CO ₂ Emissionen 161.8 → 171.0	Kumulative CO ₂ Emissionen 162.5 → 171.2	Kumulative CO ₂ Emissionen 157.6 → 165.1
Beschl. Nachfrage	Kumulative Kosten 53.5 → 59.9	Kumulative Kosten 52.0 → 57.6	Kumulative Kosten 51.8 → 59.3
	Kumulative CO ₂ Emissionen 130.3 → 152.2	Kumulative CO ₂ Emissionen 132.4 → 153.4	Kumulative CO ₂ Emissionen 122.8 → 139.5

Abbildung 14: Verteilung der kumulativen Kosten (Milliarden Euro) und der kumulativen CO₂-Emissionen (Millionen Tonnen) für die beiden Strategien und unter allen Szenarien. Die höheren Kosten gehören jeweils zur emissionsorientierten Strategie, die höheren Emissionen jeweils zur kostenorientierten Strategie.

Eine ambitionierte Verbrauchsreduktion erlaubt sowohl bei Kosten als auch bei den Emissionen erhebliche Einsparungen. Auffällig ist dabei, dass die emissionsorientierte Strategie die Einsparung bei den Emissionen im Fall der beschleunigten Nachfrageverringering sogar noch vergrößert, während die Kosten weniger weit über denen der kostenorientierten Strategie liegen. Insgesamt legt dies nahe, dass die Reduktion des Stromverbrauchs Teil jeder regionalen Entwicklungsstrategie sein sollte (vgl. Abbildung 14).

Ein Vergleich der Kosten- und Emissionsprofile mit und ohne Berücksichtigung des regionalen Klimawandels befindet sich in Abbildung 15 und Abbildung 16. Für das Rahmenszenario B, welches nur die Veränderungen der monatlichen Klimamittelwerte gemäß dem moderaten A1B-Szenario des IPCC einbezieht, zeigt sich, dass der Klimawandel vor allem wegen des steigenden Kühlbedarfs zu leicht erhöhten Emissionen und Kosten führt, die aber im Vergleich zu den Veränderungen durch den klimaschutzbedingten Umbau der Energieversorgung gering sind. Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Häufigkeit und Stärke von

Extremereignissen und deren Effekt auf die Energieversorgung sind mit zu großen Unsicherheiten behaftet, um an dieser Stelle Schlüsse daraus zu ziehen.

Weitere Details zu den einzelnen Strategien und Szenarien sowie den von ihnen generierten Resultaten finden sich in [Ruth et al].

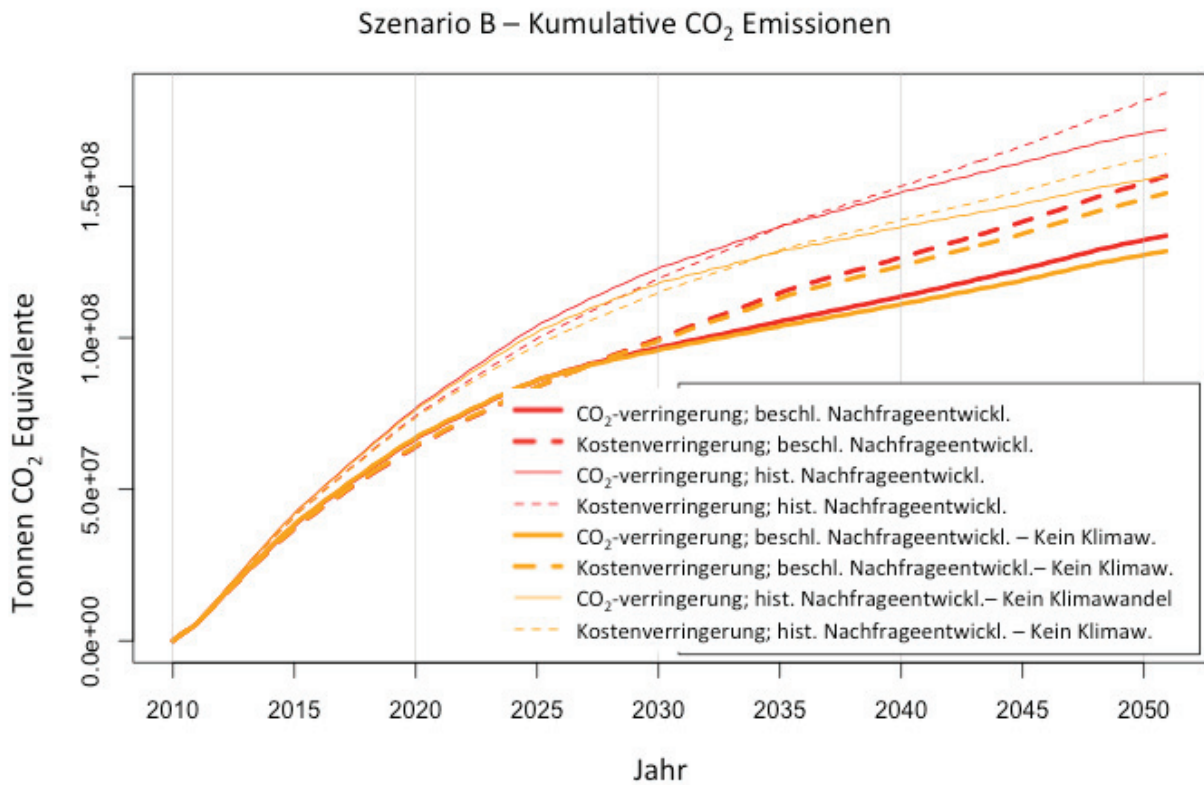


Abbildung 15: Kumulative CO₂ Emissionen unter historischer und beschleunigter Nachfrageentwicklung, mit und ohne Klimawandel

Szenario B – Kumulative Kosten

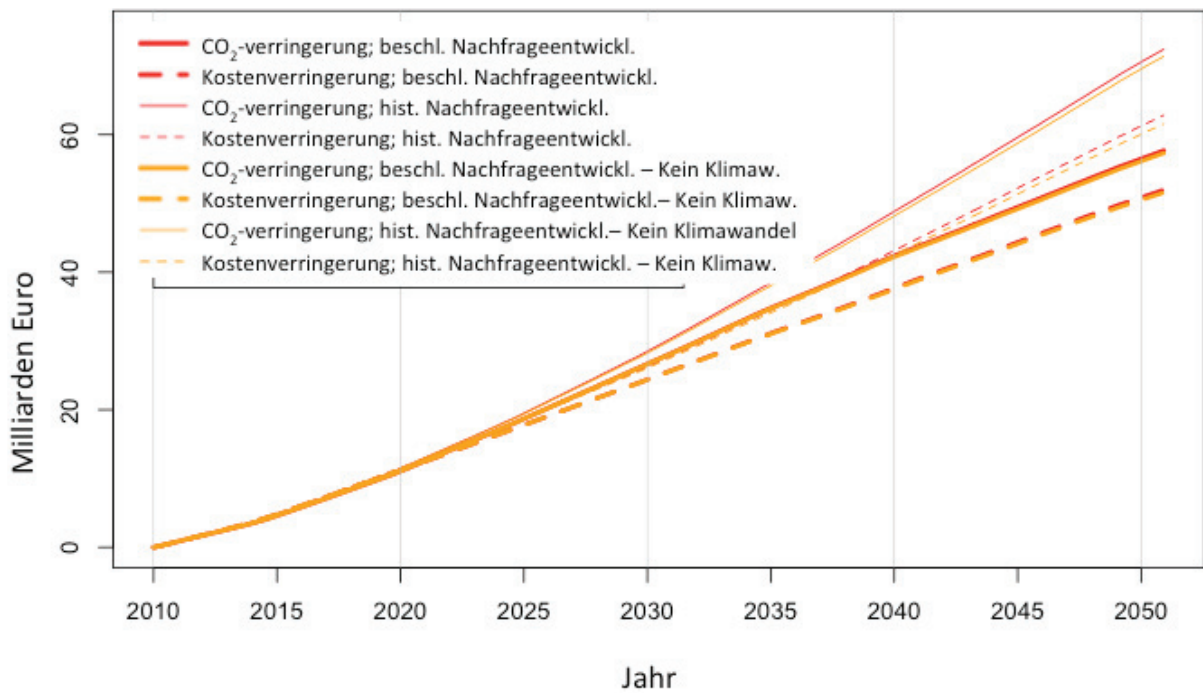


Abbildung 16: Kumulative Kosten unter historischer und beschleunigter Nachfrageentwicklung, mit und ohne Klimawandel

4. Literaturverzeichnis

Ruth, M., Özgun, O., Wachsmuth, J., Blohm A., Gasper, R., Gößling-Reisemann, S., Eickemeier, T., Karlstetter, N. & Stührmann, S: Dynamics of Energy Transitions under Climate Change in Northwest Germany. Submitted to the Western Regional Science Association.

Wachsmuth, J.(2013). Rahmenszenarien: Entwicklung dreier Szenarien für mögliche Rahmenbedingungen in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten im Jahr 2050.'nordwest2050'-Werkstattbericht Nr.22.Bremen: Universität Bremen.

Wachsmuth, J., Blohm A., Gößling-Reisemann, S., Eickemeier, T., Gasper, R., Ruth, M., & Stührmann, S. (2013). How will renewable power generation be affected by climate change? – The case of a metropolitan region in Northwest Germany. *Energy*, 58, 192–201.