

Energieszenarien für Deutschland: Stand der Literatur und methodische Auswertung

T. Kronenberg, D. Martinsen, T. Pesch, M. Sander, W. Fischer, J.-Fr. Hake, W. Kuckshinrichs, P. Markewitz, Forschungszentrum Jülich GmbH

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird eine Auswahl von Szenarien für das Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland ausgewertet und gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Szenarien weisen eine beträchtliche Bandbreite auf. Gewisse Trends wie z.B. eine deutliche Zunahme der Bedeutung von erneuerbaren Energien und eine beträchtliche Verbesserung der Energieeffizienz sind allen Szenarien gemein, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß. Erhebliche Unterschiede bestehen in der erwarteten wirtschaftlichen Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts, das in manchen Szenarien deutlich schneller wächst als in anderen, und in der bis 2030 oder 2050 erreichten Emissionsminderung. Diese Unterschiede resultieren u.a. aus unterschiedlichen Zielvorstellungen. Zukünftige Arbeiten zu Energieszenarien sollten mehr Transparenz im Hinblick auf die unterstellten Ziele, die verwendeten Methoden und die zugrunde liegenden Daten anstreben.

1. Einleitung

Die Energie- und Klimapolitik der Bundesrepublik Deutschland wird in zunehmenden Maß vom Leitbild der *nachhaltigen Entwicklung* geprägt. Auch wenn über eine präzise Definition und Operationalisierung dieses Leitbilds noch diskutiert wird, sind einige wesentliche Merkmale einer Entwicklung, die das Adjektiv „nachhaltig“ verdient, bereits deutlich geworden. Dazu gehört allem voran das Ziel der intergenerationellen Gerechtigkeit. Dieses geht über das traditionelle Ziel der sozialen Gerechtigkeit, das sich auf eine gerechte Verteilung von Einkommen und Vermögen innerhalb der gegenwärtig lebenden Generationen konzentriert, hinaus und erfordert eine gerechte Verteilung von Einkommen, Vermögen und natürlichen Ressourcen zwischen den gegenwärtigen und zukünftigen Generationen. Da der zeitliche Abstand zwischen zwei Generationen üblicherweise zwei Jahrzehnte und mehr umfasst, muss eine Politik mit dem Ziel der nachhaltigen Entwicklung auf einer entsprechend langfristigen Analyse und Planung aufsetzen. Ein angemessenes Werkzeug für wissenschaftliche Untersuchungen, die sich auf Zeiträume von mehreren Jahrzehnten beziehen, stellt die *Szenarienanalyse* dar.

Das Energiesystem spielt aufgrund der damit verbundenen Umweltbelastungen und der begrenzten Verfügbarkeit von fossilen Rohstoffen, aber auch aufgrund seiner wirtschaftlichen Bedeutung, eine hervorgehobene Rolle in der Diskussion um eine nachhaltige Entwicklung. Aus diesem Grund ist in den letzten Jahren eine beträchtliche Anzahl von Szenarien zur Entwicklung des Energiesystems entstanden. All diese Szenarien beschreiben mögliche Entwicklungen, die das Energiesystem in den kommenden 20 bis 40 Jahren durchlaufen könnte. Einige Szenarien weisen einen eher prognostischen Charakter auf und versuchen, eine möglichst wahrscheinliche Entwicklung zu beschreiben. Andere Energieszenarien beschäftigen sich mit der Frage, in welcher Form das Energiesystem zukünftig gestaltet werden sollte, um einerseits eine sichere Energieversorgung zu gewährleisten und andererseits

die Belastungen für die Umwelt ebenso wie die Kosten für die Energieverbraucher in einem akzeptablen Umfang zu halten.

Tabelle 1: Liste der ausgewählten Studien

Kürzel	(Kurz-)Titel	Auftraggeber / Herausgeber
ENREPIV	Energierport IV	BMWi [BMWi, 2005]
SZEN2007	Energieszenarien für den Energiegipfel 2007	BMWi [EWI/Prognos, 2007]
EET2007	European Energy and Transport - Trends to 2030. Update 2007	Europäische Kommission [European Commission, 2008]
PolIV	Politiksznarien für den Klimaschutz IV	BMU/UBA [Markewitz & Matthes, 2008]
PRIMES2008	Model-based Analysis of the 2008 EU Policy Package on Climate Change and Renewables	Europäische Kommission [Capros et al., 2008]
ESSO2008	Energieprognose 2008	ESSO [ExxonMobil, 2008]
EWI2008	Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030	VDEW et al. [EWI & EEFA, 2008]
BMU2008	Leitstudie 2008	BMU [BMU, 2008]
ShellPKW	Shell PKW-Szenarien bis 2030	Shell [Shell, 2009]
BMU2009	Leitszenario 2009	BMU [BMU, 2009]
STE2009	Future Climate Engineering Solutions	VDI et al. [Danish Society of Engineers, 2009]
ÖKO2009	Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken	WWF [Öko-Institut & Prognos, 2009]
ESSO2009	Energieprognose 2009–2030	ESSO [ExxonMobil, 2009]
PolV	Politiksznarien für den Klimaschutz V	BMU/UBA [UBA, 2009]
FfE2009	Energiezukunft 2050	EnBW, E.ON Energie, RWE Power, Vattenfall Europe [FfE, 2009]
IWES2009	Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche	Bundesverband Erneuerbare Energie [Fraunhofer IWES, 2009]
IER2009	Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 Energieprognose 2009	BMWi [IER et al., 2009]
ShellLKW	Shell Lkw-Studie	Shell [Shell, 2010]
FVEE2010	Energiekonzept 2050	FVEE [FVEE, 2010]
UBA2010	Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerb. Quellen	UBA [UBA, 2010]
EET2009	EU energy trends to 2030. Update 2009	Europäische Kommission [European Commission, 2009]
SZEN2010	Energieszenarien für ein Konzept der Bundesregierung	BMWi [EWI et al., 2010]
BMU2010	Leitstudie 2010	BMU [DLR et al., 2010]
SRU2011	Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung	Sachverständigenrat für Umweltfragen [SRU, 2011]

Quelle: Eigene Darstellung

IEK-STE 2012

Die zahlreichen Energieszenarien, die von verschiedenen Instituten erstellt werden, beruhen auf unterschiedlichen Annahmen über zukünftige Entwicklungen im Energiesystem. Dies betrifft technologische Entwicklungen, beispielsweise Effizienzverbesserungen bei relativ neuen Anwendungen im Bereich der erneuerbaren Energien, ebenso wie bestimmte Entwicklungen im Bereich von Politik und Wirtschaft. Zusätzlich werden unterschiedliche politische Ziele unterstellt und es kommen unterschiedliche Methoden zur Modellierung technologischer und wirtschaftlicher Zusammenhänge zum Einsatz. Die Folge davon ist eine beträchtliche Bandbreite an Energieszenarien und der darin beschriebenen möglichen Zukünfte.

Das Ziel des vorliegenden Papiers ist es, diese Fülle an Energieszenarien genauer zu analysieren, zu strukturieren und gegenüberzustellen. Die Autoren hoffen, dadurch zu einem besseren Verständnis der bestehenden Energieszenarien und der Unterschiede zwischen diesen beizutragen. Außerdem werden methodische und inhaltliche Schwachstellen der bestehenden Szenarien diskutiert, die bei der Erstellung von neuen Energieszenarien wenn möglich behoben werden sollten. Zu diesem Zweck wurde eine Reihe von Szenarien für das deutsche Energiesystem zur Analyse ausgewählt.

2. Szenarienauswahl

2.1. Auswahlkriterien

Das erste Auswahlkriterium für die zu untersuchenden Studien bestand darin, dass sie einen starken Energiebezug haben sollten und ihr Fokus auf Deutschland liegen sollte. Außerdem sollten sie sich durch eine gewisse Relevanz für die energiepolitische Diskussion auszeichnen. Letztere wird unter anderem dadurch erreicht, dass hinter den Studien ein Auftraggeber steht, der aus politischer oder wirtschaftlicher Sicht von hoher Bedeutung ist. Dies ist der Fall bei Regierungsstellen wie z.B. BMWi oder BMU, Verbänden (z.B. VDEW oder VDI) oder bestimmten Nichtregierungsorganisationen (z.B. WWF). Auch Studien, bei deren Herausgeber es sich um große Unternehmen der Energiewirtschaft (Shell, Esso) handelt, erfüllen das Kriterium der energiepolitischen Relevanz. Ferner wurde beschlossen, nur einigermaßen aktuelle Studien in die Analyse einzubeziehen. Aus diesem Grund wurden nur Studien, die zwischen 2005 und 2011 veröffentlicht wurden, ausgewählt.

Anhand dieser Kriterien wurden 24 Studien für eine weitergehende Analyse ausgewählt. Da in mehreren Studien eine gewisse Bandbreite an unterschiedlichen Szenarien beschrieben wird, waren somit etwa 70 Einzelszenarien zu analysieren. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die ausgewählten Studien und die im Folgenden verwendeten Kürzel.

2.2. Eigenschaften der ausgewählten Szenarien

Die wesentlichen *Eigenschaften* der ausgewählten Szenarien sind in Tabelle 2 aufgeführt. Bei der *Szenarienweite* wird einerseits die geografische Abdeckung (Deutschland, Europa) und andererseits die sektorale Systemgrenze (Energiesystem, Gesamtwirtschaft, andere Teilbereiche wie z.B. Verkehr) berücksichtigt. Da es sich um Szenarien mit einem starken Energiebezug handelt, ist in der Auswahl eine beträchtliche Anzahl von Szenarien enthalten, die sich ausschließlich auf das Energiesystem Deutschlands beziehen. Einige Szenarien enthalten einen weiteren geografischen Rahmen und beziehen sich auf das Energiesystem der gesamten EU. Andere Szenarien beschränken sich ebenfalls auf Deutschland, beziehen aber neben dem Energiesystem auch andere Bereiche wie z.B. den Strommarkt oder den

Güterverkehr mit in die Analyse ein. Eine kleine Anzahl von Szenarien beschäftigt sich außerdem mit der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung und nimmt eine Wirkungsanalyse auf makroökonomischer Ebene vor.

Tabelle 2: Eigenschaften der Szenarien

Studie	Szenarienweite	Szenarien	Horizont
ENREPIV	Energiesystem D	1. Referenzszenario 2. Ölpreisvariante	2030
SZEN2007	Energiesystem D	1. Koalitionsvertrag (KV) 2. Erneuerbare Energien (EE) 3. Laufzeitverlängerung (KKW)	2020
EET2007	Energiesystem EU Einzelne Staaten	1. Referenzszenario PRIMES UPDATE 2007	2030
PolIV	Sektorale Betrachtung + Integration mit Energiesystemmodell D	1. Ohne-Maßnahmen-Szenario (OMS) 2. Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) 3. Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS)	2030
PRIMES2008	Energiesystem EU	Insgesamt 9 Szenarien: 1. Baseline-Szenario (BL) 2. Ziele ohne EE-Zertifikathandel RSAT 3. Ziele mit EE-Zertifikathandel NSAT 4. Hohe Energiepreisen HOG-BL Weitere: RSAT-CDM, NSAT-CDM, CES, CES-CDM, HOG-CES	2030
ESSO2008	Energiesystem D	1. Kernenergie bis 2020 & kein CCS 2. Kernenergie bis 2030 & CCS ab 2021	2020
EWI2008	Stromsektor D + makroökonomische Wirkungsanalyse	1. Umsetzung der klimapolitischen Ziele der EU für 2020 2. Möglichst kostengünstige Erfüllung der THG-Reduktionsziele 3. Variante zu 2, mit Auktionierung der ETS- Zertifikate 4. Berücksichtigung weitergehender Ziele mit Kernenergieausstieg	2030
BMU2008	Teilmodelle + Trendfortschreibung + Experteneinschätzung	6 Szenarien: Leitszenario + Effizienzsznarien E1-E3 + Defizitszenarien D, D2	2050

ShellPKW	Personenverkehr D Basis: Demographie, wirtschaftliche und technische Entwicklung.	1. Sozioökonomisches Leitszenario 2. Trend-Szenario „Automobile Anpassung“ 3. Alternativ-Szenario: Auto-Mobilität im Wandel	2030
BMU2009	Teilmodelle + Trendfortschreibung + Experteneinschätzung	1. Leitszenario 2009: Fortschreibung BMU Leitstudie 2008	2050
STE2009	Energiesystem D	1. Referenz: BAU 2. CA: -77% CO ₂ bis 2050, mit CCS 3. CB: -77% CO ₂ bis 2050, ohne CCS 4. CC: -77% CO ₂ bis 2050, mit CCS, KKW-Laufzeit 60 Jahre	2050
ÖKO2009	Teilmodelle D für Endverbrauchssektoren + EU27-Kraftwerksmodell	1. Referenzszenario (mit/ohne CCS) 2. Innovationsszenario, mit Ziel 95%-CO ₂ Reduktion (mit/ ohne CCS)	2050
ESSO2009	Keine Angabe. Erdgasspezifisch	1. Prognoserechnung für Erdgas	2030
PolV	Sektorale Modelle Integration mit Energiesystemmodell D (IKARUS)	1. Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) 2. Strukturwandel-Szenario (SWS) mit zusätzlicher Maßnahmen/ Vorgaben	2030
Ffe2009	Hochrechnung D von Nutzenergie (detailliert) zur Primärenergie	1. Referenzszenario 2. Erhöhte Technikeffizienz 3. Umweltbewusstes Handeln (Wie 2 + Komforteinbußen, Bedarfsenkung)	2050
IWES2009	Strommodell, Strommarktmodell	1. BEE-Szenario „Stromversorgung 2020 – Wege in eine moderne Energiewirtschaft“	2020
IER2009	Sektorenmodelle Energiesystemmodell Makroökonomie Strommarktmodell	1. Referenzszenario mit KE-Ausstieg, 40, 60 J Laufzeit 2. 6 Sensitivitätsszenarien Wirtschaft, Ölpreis, Klimaschutz, Bevölkerung	2030, Ausblick 2050
ShellLKW	Güterverkehr D	1. Trend-Szenario 2. Alternativ-Szenario mit geringerem Verbrauch und alternative Kraftstoffe	2030
FVEE2010	Sektorale Trendfortschreibungen	1. 100%-EE Szenario	2050
UBA2010	Strommodell + Zusatzmodule für Wind,	100% EE in 2050:	2050

	PV, Speicher, Lastmanagement	<ol style="list-style-type: none"> 1. Szenario „Regionenverbund“: 2. Szenario „International-Großtechnik“ mit int. Stromaustausch 3. Szenario „Lokal-Autark“: Dezentrale, Stromversorgung ohne Stromimport 	
EET2009	Energiesystem EU	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baseline-Szenario mit bisheriger Energie- und Klimapolitik 2. Reference-Szenario mit EU Ziele (2009/28/EC, 2009/406/EC) 	2030
SZEN2010	Endsektorenmodelle Strommodell Energiesystem D Makroökonomie	<ol style="list-style-type: none"> 1. Referenzszenario mit KKW-Ausstieg 2. Varianten mit KKW-Laufzeit (+4,+12,+20,+28) 	2050
BMU2010	Strommodell D	<ol style="list-style-type: none"> 1. Basisszenario 2010 A: KKW bis 2022, Elektromobilität bis 2050 33%. 2. Basisszenario 2010 B: KKW bis 2022. Elektromobilität bis 2050 66%. 3. Basisszenario 2010 C: Wie 2010A mit KKW Laufzeit + 12 J 4. Szenario B-100%-S/H2: Wie 2010 B + 100% EE Strom bis 2050 	2050
SRU2011	Strommodell D	<p>Jeweils mit zwei Stromnachfragen 500TWh (a) und 700TWh (b)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Selbstversorgung 2. Netto-Selbstversorgung, Austausch mit DK/NO 3. Maximal 15% Nettoimport aus DK/NO 4. Maximal 15% Nettoimport aus Europa und Nordafrika 	2050

Quelle: Eigene Darstellung

IEK-STE 2012

Der *zeitliche Horizont* reicht bei den meisten Szenarien bis 2030, in manchen Fällen auch bis 2050. Tendenziell ist festzustellen, dass die älteren Szenarien (vor 2009) eher bis 2030 reichen und die neueren Szenarien meistens bis 2050. Der Analysezeitraum hat sich also deutlich vergrößert. Bisher gibt es allerdings kein Szenario, das über das Jahr 2050 quantitative Rechnungen vornimmt¹.

¹ In der Klimaforschung werden extrem langfristige Szenarien konstruiert, z.B. die Szenarien der internationalen Gruppe, an der auch das PIK beteiligt ist [Meinshausen et al., 2011]. Diese sind allerdings thematisch anders gelagert als die hier untersuchten Szenarien mit einem Fokus auf Energie.

Der *Charakter* eines Szenarios wird durch seine inhaltliche Ausrichtung und Zielsetzung bestimmt. Es wird unterschieden zwischen zielorientierten, normativen Szenarien einerseits und Abbildung des Szenarios andererseits. Normative Szenarien sind rückblickende Szenarien in dem Sinne, dass sie zunächst ein bestimmtes Ergebnis (die Zielerreichung) für einen zukünftigen Zeitpunkt postulieren, sich dann von dort aus zurück zur Gegenwart arbeiten und dabei die Entwicklungen, die zum Erreichen des Ziels angestoßen werden müssen, identifizieren. Indikative Szenarien dagegen beginnen in der Gegenwart, treffen bestimmte Annahmen über das Verhalten der relevanten Akteure (Haushalte, Firmen, öffentliche Einrichtungen) und verfolgen dann die Effekte dieser Entscheidung über einen gewissen Zeitraum. Ein indikatives Szenario muss nicht unbedingt eine besonders wünschenswerte Zukunft beschreiben. Im Gegenteil, es ist durchaus möglich, mit dieser Methode die Effekte von äußerst widrigen Ereignissen (zum Beispiel Naturkatastrophen oder schwere politische Krisen) zu analysieren und sogenannte „Worst-Case-Szenarien“ aufzustellen. Andere Arten von indikativen Szenarien sind Status-Quo-Szenarien (die Parameter werden konstant gehalten), Business-As-Usual-Szenarien (Parameter entwickeln sich entlang von extrapolierten Trends), Referenzszenarien (Parameter nehmen Werte an, die man für „wahrscheinlich“ hält) und explorative Szenarien (Parameter nehmen unwahrscheinliche aber mögliche Werte an). Mit dieser Technik kann ein ganzer Fächer möglicher Zukünfte aufgespannt werden, was die Berücksichtigung der vorhandenen Risiken und Unsicherheiten ermöglicht.

Unter den ausgewählten Szenarien (Tabelle 1) finden sich mehrere Szenarien von prognostischer und normativer Natur. Die „Energieprognose 2009“ [[IER et al., 2009](#)] stellt, wie schon der Titel nahelegt, ein Beispiel für einen eher prognostischen Ansatz dar. In dieser Studie werden Entwicklungen beschrieben, die von den Autoren für wahrscheinlich gehalten werden. Die Erreichung von bestimmten Politikzielen wird nicht vorausgesetzt. Stattdessen wird zunächst eine mögliche Zukunft beschrieben; im Nachhinein wird überprüft, ob in dieser Zukunft die Nachhaltigkeitsziele der Bundesregierung erfüllt werden. Mit Hilfe dieser Technik können die Autoren der Frage nachgehen, ob die im Szenario unterstellten politischen Maßnahmen ausreichen, um die Zielerreichung zu gewährleisten. Einen normativen Szenarienansatz findet man dagegen zum Beispiel in der Studie des Sachverständigenrats für Umweltfragen [[SRU, 2011](#)]. Darin wird ein bestimmtes politisches Ziel postuliert (hier: eine Stromversorgung, die zu 100 Prozent auf erneuerbaren Energien beruht). Davon ausgehend werden Maßnahmen vorgeschlagen, die zur Erreichung dieses Ziels geeignet scheinen. Eine klare Trennung zwischen normativen und prognostischen Szenarien ist allerdings nicht immer eindeutig möglich. In zahlreichen Studien sind sowohl prognostische als auch normative Elemente zu finden.

3. Gegenüberstellung der zentralen Ergebnisse

Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Energieversorgung sind zahlreiche Aspekte zu beachten. Eine gewisse Schwerpunktsetzung bei der Ergebnisdarstellung ist aber zu beobachten und wird auch im Folgenden angewendet. Besondere Aufmerksamkeit wird in fast allen Szenarien den CO₂-Emissionen gewidmet, weil das Ziel des Klimaschutzes in der deutschen Energiepolitik große Beachtung findet. Auch das Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist von großer Bedeutung, zum einen weil eine starke Korrelation zwischen BIP und Energienachfrage besteht und zum anderen weil das Wachstum des BIP andere Politikfelder (Beschäftigung, Finanzierung staatlicher Aufgaben) in hohem Maße beeinflusst. Für das

Energiesystem an sich sind vor allem der Primärenergieverbrauch und die Stromerzeugung von Interesse².

Bei einer Gegenüberstellung der zentralen Ergebnisse muss beachtet werden, dass nicht alle Szenarien vergleichbare Ergebnisse darstellen. So werden etwa die CO₂-Emissionen in manchen Szenarien quantitativ angegeben; andere Szenarien dagegen gehen auf die Höhe der Emissionen nicht näher ein.

3.1. CO₂-Emissionen

Die CO₂-Emissionen in den verschiedenen Studien variieren relativ stark (Abbildung 1). Sie lassen sich aber in drei Kategorien einteilen, wobei dann die Unterschiede innerhalb einer Kategorie weniger stark ausfallen.

In der ersten Kategorie werden die Referenz- oder Business-as-usual-Szenarien, d.h. Szenarien mit einer Fortschreibung der heutigen (oder im Studienjahr bekannten) Maßnahmen zur Energieeffizienz bzw. Emissionsminderung, eingeordnet. In der normierten Darstellung (1990 = 1) in Abb. 1 ergeben sich CO₂-Minderungen von etwa 37 bis 49 Prozent bis 2050 im Vergleich zu 1990.

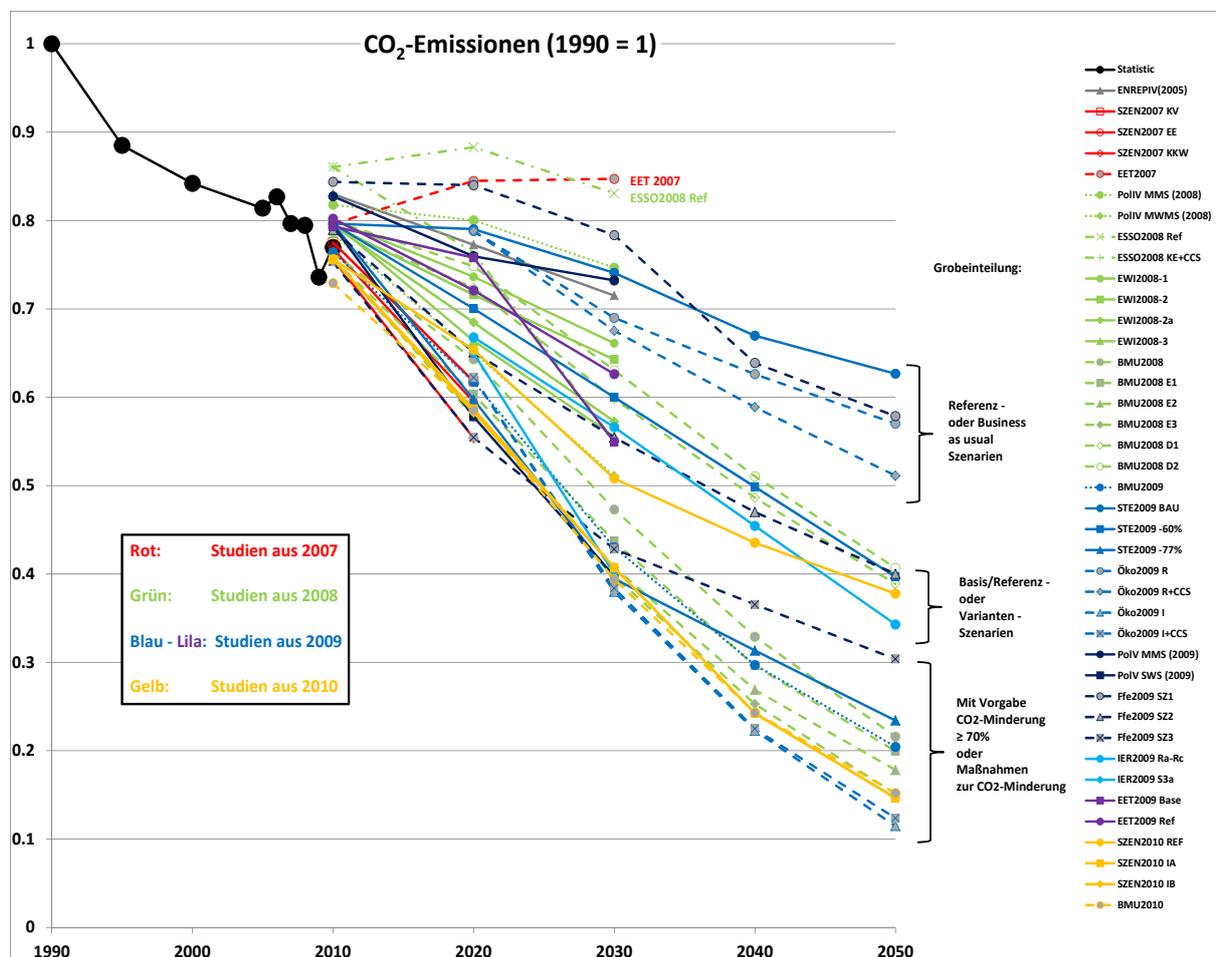


Abbildung 1: CO₂-Emissionen (Quelle: eigene Darstellung)

IEK-STE 2012

² Im Energiekonzept der Bundesregierung spielt auch die Wärmeerzeugung eine wichtige Rolle, dieser wird aber in den meisten der hier untersuchten Szenarien noch nicht Rechnung getragen.

In der zweiten Kategorie gruppieren sich Szenarien, die auf Basis- oder Referenzszenarien als Varianten aufsetzen, die aber keine sehr strengen Vorgaben zur Emissionsminderung enthalten.

Zu der dritten Kategorie gehören Szenarien mit einer oberen Grenze für die Emissionen (Minderung $\geq 70\%$ bis 2050) oder wo Maßnahmen vorgegeben sind, die zu einer CO₂-Minderung von mindestens 70% bis 2050 führen. Je nach Studie ergeben sich CO₂-Reduktionen von 70 bis 89% im Zeitraum 1990 - 2050. Im Mittel gehen die CO₂-Emissionen um ca. 80% im Vergleich zu 1990 zurück. Dies ist auch die Zielsetzung der Bundesregierung in ihrem neuen Energiekonzept vom Juni 2011.

3.2. Bruttoinlandsprodukt

Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) gilt als zentrale Messgröße für den langfristigen wirtschaftlichen Erfolg eines Landes³. Deswegen gehen zahlreiche (wenn auch nicht alle) Szenarien auf die Entwicklung des BIP unter den beschriebenen Umständen ein. Dabei ist festzustellen, dass in manchen Szenarien das BIP deutlich schneller wächst als in anderen und somit bis zum Jahr 2050 (bzw. 2030) beträchtliche Abweichungen in der Höhe des BIP festzustellen sind. Die Entwicklung des BIP in den Szenarien, welche Angaben über das BIP machen, ist in Abbildung 2 dargestellt.

Bis zum Jahr 2010 liegen Daten des statistischen Bundesamts (Destatis) über die tatsächliche BIP-Entwicklung vor; diese sind ebenfalls in Abbildung 2 dargestellt. Auffällig ist der deutliche Rückgang des BIP im wirtschaftlichen Krisenjahr 2009. Dieser hat dazu geführt, dass die älteren Szenarien bereits im Jahr 2010 BIP-Werte aufweisen, die teilweise weit über dem tatsächlichen Wert liegen (vor allem PolIV). Zudem kann man beobachten, dass die älteren Szenarien wie z.B. EWI2008 von einem bis 2030 rasch ansteigenden BIP ausgehen, wohingegen die neueren Szenarien, die im Jahr 2009 oder später veröffentlicht wurden, einen deutlich langsameren Anstieg des BIP beschreiben. Der Eindruck der schweren weltweiten Wirtschaftskrise scheint also die Erwartungen in Bezug auf die langfristigen Wachstumsperspektiven beeinflusst zu haben.

Aus rein ökonomischer Sicht ist ein rasches BIP-Wachstum wünschenswert, weil dies zur Verringerung der Arbeitslosigkeit beiträgt, die Bedienung ausstehender Schulden erleichtert und im Allgemeinen das Potential der Volkswirtschaft zur Erfüllung menschlicher Bedürfnisse (materieller Konsum, Bildung, Kultur, Gesundheit) erhöht. Andererseits führt ein rasch wachsendes BIP bei gegebener Technologie und gegebenen Verbrauchsmustern zu ebenso rasch wachsenden CO₂-Emissionen und sonstigen Umweltbelastungen.

Wenn die Emissionen gemäß politisch gesetzten Zielen in einem bestimmten Rahmen abnehmen sollen, werden also bei raschem BIP-Wachstum höhere Anforderungen an die Entwickler von neuen Technologien, die Investoren und die Konsumenten gestellt. Erstere müssen größere Erfolge bei der Entwicklung von emissionsarmen Technologien erzielen; Letztere müssen eventuell ihre Konsummuster in größerem Maße anpassen und weniger emissionsintensive Produkte nachfragen. Mit anderen Worten: In Szenarien mit niedrigem BIP-Wachstum ist es relativ einfach, ein gegebenes Emissionsziel zu erreichen, wohingegen

³ Das BIP pro Kopf wird gelegentlich auch als Wohlfahrtsindikator interpretiert. Diese Interpretation ist mit Schwierigkeiten behaftet, weil das BIP pro Kopf zum einen nicht die Verteilung des BIP berücksichtigt und zum anderen wesentliche wohlfahrtrelevante Faktoren nicht darin enthalten sind. Andererseits besteht ein starker Zusammenhang zwischen dem BIP-Wachstum und manchen dieser Faktoren (z.B. zwischen BIP-Wachstum und Arbeitslosigkeit).

in einem Szenario mit hohem BIP-Wachstum erklärt werden muss, woher die nötigen Effizienzgewinne kommen, die eine stärkere Entkopplung von BIP und Emissionen ermöglichen.

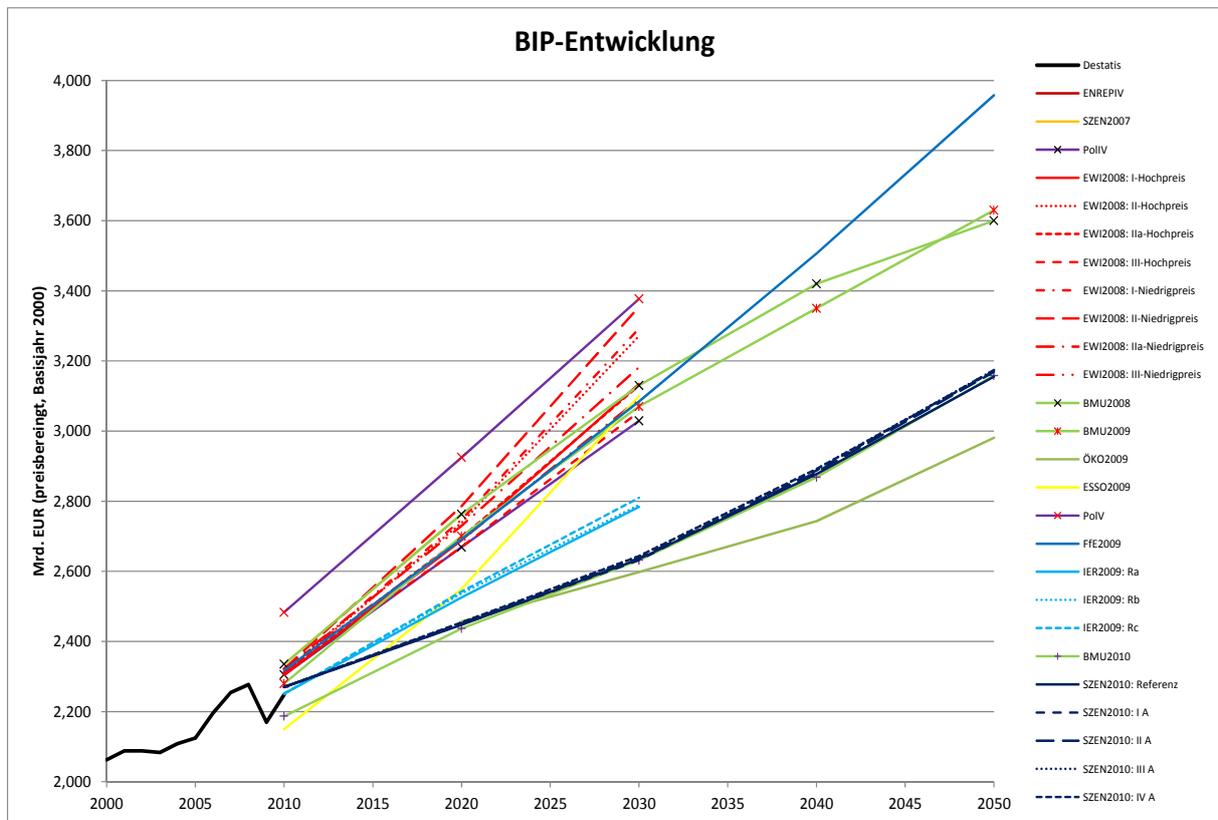


Abbildung 2: BIP-Entwicklung (Quelle: eigene Darstellung)

IEK-STE 2012

Diese Zusammenhänge lassen vermuten, dass die Szenarien mit hohen Reduktionszielen eine relativ schwache BIP-Entwicklung aufweisen (und umgekehrt). Abbildung 2 zeigt, dass dies teilweise zutrifft. Die schwächste BIP-Entwicklung ist im Szenario „ÖKO2009“ zu beobachten. Dieses Szenario weist in Abbildung 1 die stärkste Emissionsreduzierung auf. Das höchste BIP im Jahr 2050 wird im Szenario „fFe2009“ erreicht (Abbildung 2). Dieses Szenario ist in Abbildung 1 mit einem deutlich geringeren Rückgang der Emissionen verbunden. Auch bei den anderen Szenarien zeigt sich ein gewisser Zusammenhang zwischen BIP und CO₂-Emissionen.

Abbildung 3 zeigt die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten des BIP, die in den meisten Szenarien nicht explizit ausgewiesen werden, aber durch eigene Rechnungen der Autoren ermittelt bzw. geschätzt werden konnten. Auch in dieser Grafik wird deutlich, dass ÖKO2009 tatsächlich eine Zukunft mit einem vergleichsweise schwachen BIP-Wachstum beschreibt. Allerdings sind die durchschnittlichen Wachstumsraten in SZEN2010 nur unwesentlich größer; sie bewegen sich ebenfalls unter einem Prozent pro Jahr. Bei den älteren Szenarien wie PolV und EWI2008 dagegen sind Wachstumsraten von 1,5 Prozent und mehr zu verzeichnen (jedenfalls bis 2030). Der Vergleich von Abbildung 2 und Abbildung 3 macht deutlich, dass geringfügige Abweichungen in der Wachstumsrate des BIP sich über die

Jahrzehnte hinweg zu beträchtlichen Abweichungen im *Niveau* des BIP summieren können. So liegt das BIP bei FfE2009 im Jahr 2050 um fast ein Drittel höher als bei ÖKO2009.

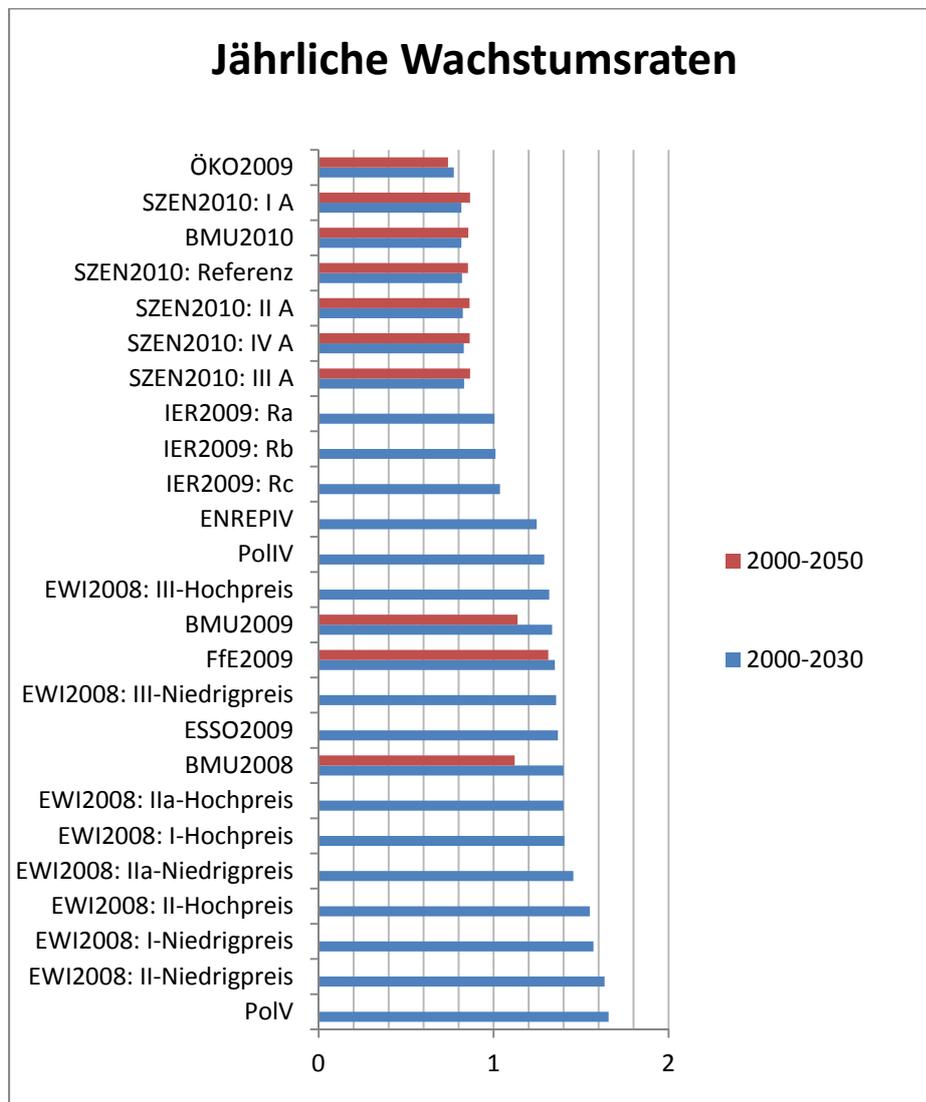


Abbildung 3: BIP-Wachstum pro Jahr (Quelle: eigene Darstellung)

IEK-STE 2012

3.3. Primärenergieverbrauch

Die Projektionen des Primärenergieverbrauchs in den verschiedenen Studien weisen eine starke Streuung auf (Abbildung 4). Bereits im Basisjahr 2010 kommt es zu nennenswerten Abweichungen, deren Ausmaß im Wesentlichen vom Zeitpunkt der Erstellung einer Studie abhängt. Dies ist in erster Linie auf den starken Einbruch des Primärenergieverbrauchs im Jahre 2009 zurück zu führen, der einhergehend mit der Wirtschaftskrise als Folge der Finanzkrise von 2007/2008 eingetreten ist. Bei näherer Betrachtung der Annahmen und Voraussetzungen lässt sich ähnlich wie für die Projektionen der CO₂-Emissionen eine Klassifizierung der Szenarien vornehmen.

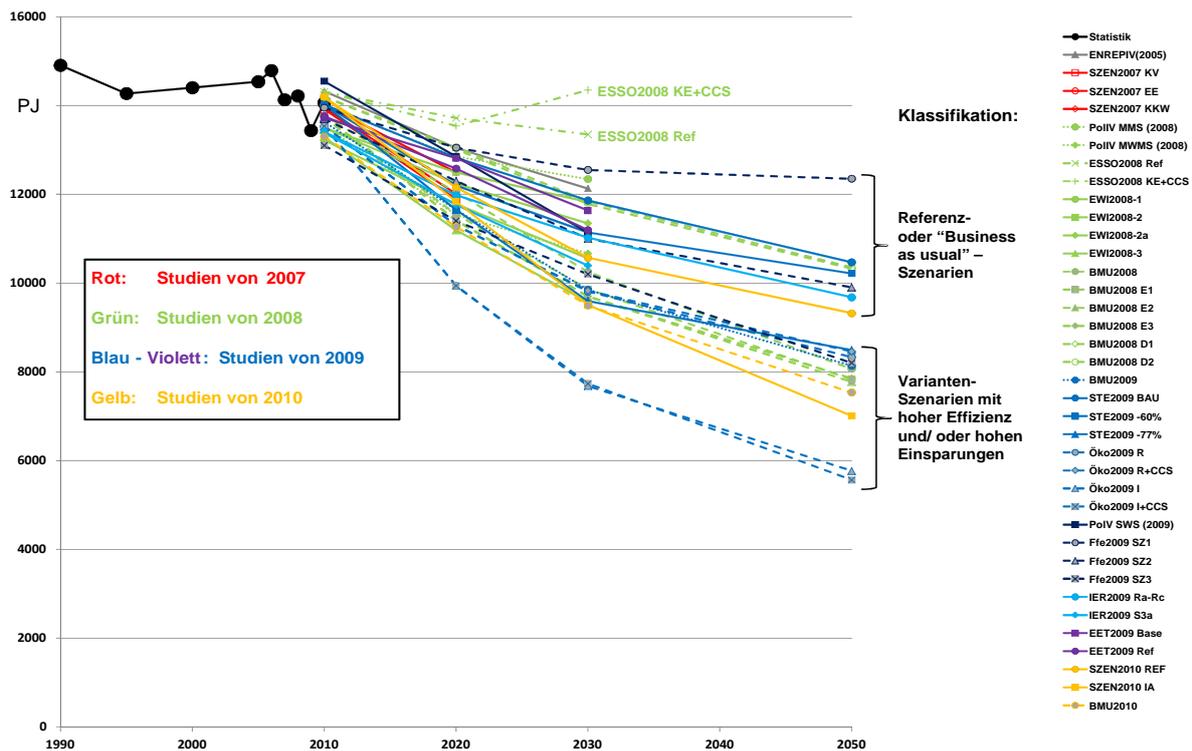


Abbildung 4: Primärenergieverbrauch (Quelle: eigene Darstellung)

IEK-STE 2012

In der ersten Klasse werden die Referenz- oder Business-as-usual-Szenarien zusammengefasst. In diesen Szenarien wird weitestgehend eine Fortschreibung der Entwicklungen im Bereich der Energieeffizienz und Energieeinsparung zugrunde gelegt. Im Vergleich zu 2010 ergeben sich Rückgänge des Primärenergieverbrauchs zwischen 25% und 34% bis 2050. Treiber dieser Entwicklung sind in nahezu allen Studien Annahmen hinsichtlich zukünftig zurückgehender Bevölkerungszahlen sowie steigender Primärenergieträgerpreise, die den Einsatz effizienterer Technologien induzieren.

Die zweite Kategorie von Szenarien umfasst Variantenrechnungen, in denen deutlich höhere Effizienzverbesserungen und/ oder Energieeinsparungen angenommen werden. Diese Szenarien bauen zum Teil auf entsprechenden Referenzszenarien auf, wobei unterschiedliche Effizienz- und Einsparmaßnahmen zusätzlich berücksichtigt werden. Zum Teil handelt es sich jedoch auch um einzelne Zukunftskonzepte, bei denen ein geringer Verbrauch von Primärenergie im Vordergrund steht. Der Rückgang des Primärenergieverbrauchs in dieser Gruppe beträgt bis 2050 zwischen 38 % und 59%. Die Zielsetzung der Bundesregierung – Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 50% bis 2050 vgl. mit 2008 - reiht sich ebenfalls in dieser Gruppe von Szenarien ein.

3.4. Stromerzeugung

Hinsichtlich der absoluten Stromerzeugung können die Szenarien in zwei grundlegende Gruppen eingeteilt werden:

Die meisten Trend- oder Referenzszenarien gehen von einem zunehmenden Stromverbrauch bis zum Zieljahr der Vorausschau aus. Den absoluten Spitzenwert erreicht dabei IER 2009 Rc - ein Referenzszenario mit einer 60-jährigen Laufzeitverlängerung für Kernkraftwerke - mit

einem Stromverbrauch von 663 TWh im Zieljahr 2030. Den höchsten Wert für das Jahr 2050 weist das Basisszenario 2010a aus BMU2010 mit 637 TWh auf. Einen anderen Trend beschreiben die Referenzszenarien von ÖKO2009 - ohne CCS - und SZEN2010. Während im ersten Fall ein relativ moderater Rückgang von 554 TWh auf 520 TWh unterstellt wird, legen die Energieszenarien eine deutlichere Entwicklung zugrunde, bei der die Bruttostromerzeugung von ca. 579,6 TWh auf 488,3 TWh abnimmt. Dies ist zugleich der niedrigste Wert, der in einem Referenzszenario für das jeweilige Zieljahr angegeben wird.

Dagegen beschreiben die Zielszenarien durchgehend eine Entwicklung, bei der sich die Stromerzeugung deutlich verringert. Den niedrigsten Wert gibt dabei mit lediglich 320 TWh das Szenario IVB aus SZEN2010 an. Damit wird impliziert, dass eine Laufzeitverlängerung von Kernkraftwerken um 28 Jahre bei einem vorgegebenen Satz von Nachrüstkosten zu größeren Einsparungen führt als die 2,3% bis 2,5% pro Jahr die für die Szenarien II und II vorgeschlagen wurden. Insgesamt beschreiben die Zielszenarien aus SZEN2010 Entwicklungen, bei denen die Bruttostromerzeugung sehr deutlich und quasi linear abnimmt. Darin unterscheiden sie sich wesentlich von den Zielszenarien aus ÖKO2009, die ebenfalls 2050 als Zieljahr nehmen. Hier gehen die Werte am deutlichsten bis 2040 zurück. Dann schwächt sich die Entwicklung ab und die Bruttostromerzeugung bleibt bis zum Jahr 2050 entweder stabil auf 405 TWh – Innovationsszenario ohne CCS – oder geht vergleichsweise geringfügig um 7,7 TWh auf 368,8 TWh zurück. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass ÖKO2009 die Nettostromerzeugung angibt, SZEN2010 dagegen die Bruttostromerzeugung.

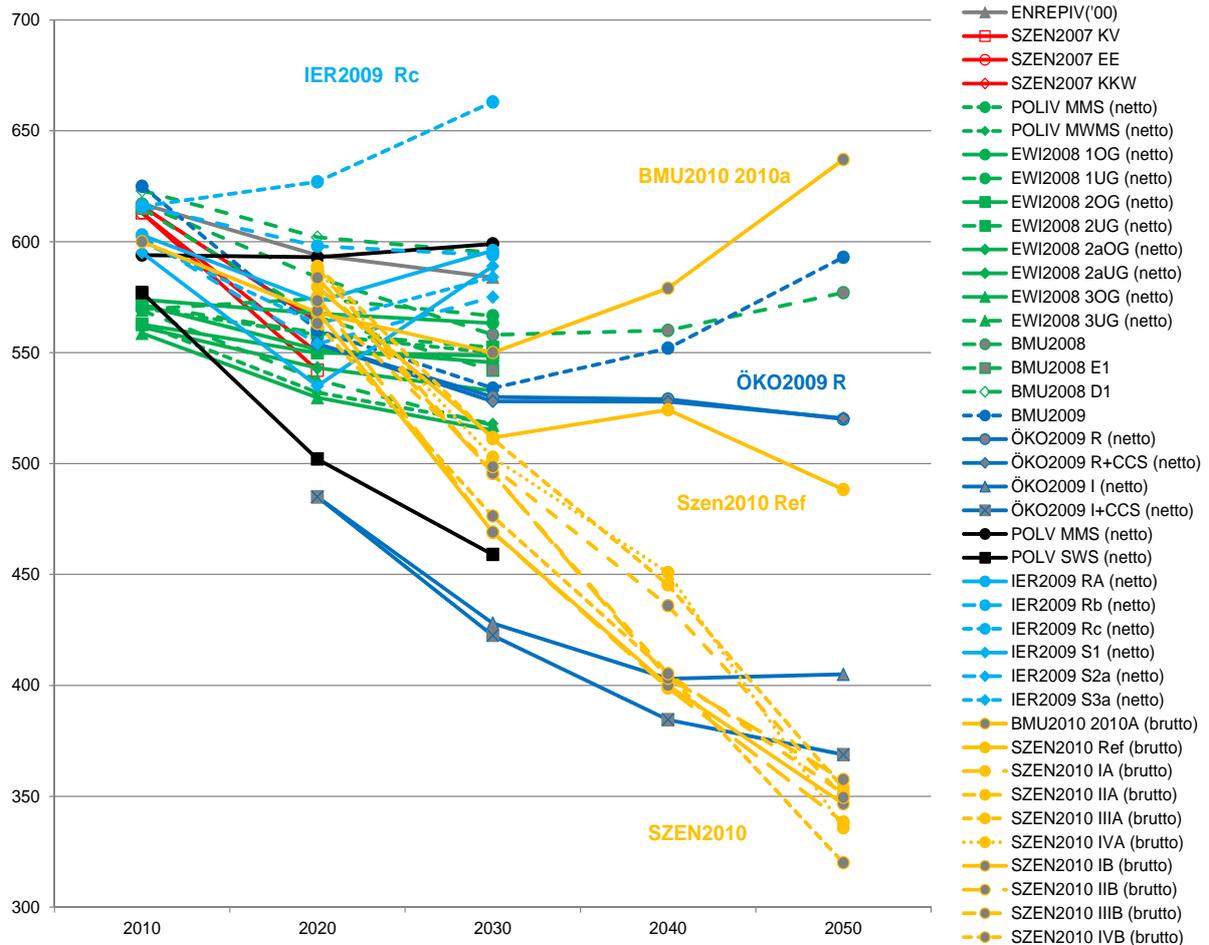


Abbildung 5: Bruttostromerzeugung Quelle: Eigene Darstellung

Wird der Energiemix in den verschiedenen Referenzszenarien betrachtet, so fallen ebenfalls deutliche Unterschiede auf, die allerdings nur teilweise aus den Modellrechnungen selbst folgen. So sind die unterschiedlichen Stellenwerte der Kernenergie sowie der Erneuerbaren in SZEN2007 und SZEN2010 neben den unterschiedlichen Zieljahren 2010 sicher auch den veränderten politischen Rahmenbedingungen geschuldet. Auch Szenarien, die dasselbe Zieljahr haben und mit geringem zeitlichem Abstand veröffentlicht wurden, unterscheiden sich in Einzelheiten, beschreiben aber grundsätzlich denselben Energiemix. Dieser ist geprägt von der dominierenden Rolle der erneuerbaren Energieträger und ähnlich großen Beiträgen von Kohle und Erdgas. Übereinstimmend mit den energiepolitischen Grundsatzentscheidungen spielt die Kernenergie keine Rolle mehr.

3.5. Zwischenfazit

Als Zwischenfazit bleibt festzuhalten, dass in allen aktuellen Szenarien die CO₂-Emissionen sinken, während das BIP weiter wächst. Dies ist nur möglich, wenn eine zunehmende „Entkopplung“ von BIP und CO₂-Emissionen eintritt. Die Daten aus der umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) zeigen, dass die CO₂-Intensität (CO₂-Emissionen geteilt durch BIP) in den vergangenen Jahren tatsächlich gefallen ist. Ob dieser Trend sich in Zukunft fortsetzt, verstärkt oder abschwächt, hängt von diversen technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Faktoren ab. Eine einfache „Trendfortschreibung“ wird diesen Themen nicht gerecht. Daraus folgt, dass eine entsprechende Analyse der zukünftigen Entkopplung von BIP und Emissionen zur Aussagekraft eines Szenarios beitragen kann.

Davon abgesehen ist zu beobachten, dass Szenarien mit sehr geringen CO₂-Emissionen in 2050 tendenziell auch von einem niedrigen BIP in 2050 ausgehen. Das Szenario mit dem höchsten BIP in 2050 (FfE2009) weist in Abbildung 1 eher geringe Emissionsminderungen aus. Umgekehrt beschreibt das Szenario mit dem niedrigsten BIP in 2050 (ÖKO2009) die deutlichsten Emissionsminderungen. Zwischen den politischen Zielen „Emissionsminderung“ und „Wohlfahrtssteigerung“ scheint also ein gewisser Konflikt zu bestehen (wenn das BIP als Wohlfahrtsindikator interpretiert werden kann, s. Abschnitt 3.2).

Schließlich ist festzustellen, dass das erwartete BIP-Wachstum in neuen Studien (2010, 2009) deutlich geringer ist als in älteren Studien. Es drängt sich die Frage auf, ob hier die Finanz- und Wirtschaftskrise, die in den Jahren 2008/1009 die deutsche Wirtschaft mit voller Wucht traf, die Autoren der Szenarien und ihre Erwartungen über die langfristige wirtschaftliche Entwicklung beeinflusste. Ob die Krise tatsächlich einen Einfluss auf die langfristige Wachstumsrate hat, ist nicht a priori klar. Wegen der hohen Bedeutung des BIP für Energienachfrage und andere Politikziele sollte ein nachhaltiges Energieszenario sich aber mit den Determinanten des langfristigen BIP-Wachstums und den Wechselwirkungen zwischen BIP und Energie- und Klimapolitik intensiver auseinandersetzen.

4. Energieszenarien aus interdisziplinärer Sicht

Bei dem Leitbild der Nachhaltigkeit handelt es sich um ein multidimensionales Konzept, das sowohl ökologische als auch wirtschaftliche und gesellschaftliche Aspekte beinhaltet. Die gesamte Bandbreite der Nachhaltigkeitsforschung kann deswegen nur mit einer interdisziplinären Herangehensweise abgedeckt werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden diskutiert, inwiefern die Szenarien einem interdisziplinären Ansatz gerecht

werden. Aus Gründen der Zweckmäßigkeit liegt der Schwerpunkt auf einer politik- und wirtschaftswissenschaftlichen Beurteilung, allerdings sollten im Rahmen von weitergehenden Forschungen auch weitere Perspektiven (z.B. Sozialwissenschaft und Umweltforschung) berücksichtigt werden.

4.1. Politikwissenschaftliche Kriterien der Szenarienformulierung

Die systematische Erarbeitung politischer und gesellschaftlicher Entwicklungslinien gilt als die „*Achillesferse modellgestützter Energiesysteme*“ [[Weimer-Jehle & Kosow, 2011](#)]. Tatsächlich scheinen sich die Energieszenarien der verschiedenen Disziplinen gegenseitig gar nicht wahrzunehmen, obwohl sie sich in Methodik und Analyseebene eigentlich ideal ergänzen sollten: Technische und wirtschaftliche Szenarien – zumindest die in dieser SWOT-Analyse berücksichtigten – setzen schwerpunktmäßig quantitative Methoden ein, um die Entwicklung von Energietechniken, Energieverbrauch, Energiemix etc. für Deutschland oder die EU zu beschreiben. Politikwissenschaftliche Szenarien im deutschsprachigen Raum verwenden dagegen hauptsächlich qualitative Instrumente und konzentrieren sich auf die außenwirtschaftliche Energieversorgungssicherheit [[Schröder & Tull, 2008](#)] sowie die internationalen Verträge und Organisationen im Energie- und Klimasektor [[Au et al., 2011](#)]. Dabei wird aus einer politikberatenden Perspektive auch untersucht, welche Regelungssysteme besonders geeignet sind, um klima- und energiepolitische Ziele zu erreichen und welche Zeitfenster voraussichtlich bestehen werden, um diese Regelungssysteme einzuführen [[Au et al., 2011](#)]. Neuere methodische Ansätze versuchen diese Bruchlinie zu überwinden, konzentrieren sich aber wiederum auf die etablierten quantifizierbaren Inputfaktoren technisch-wirtschaftlicher Energieszenarien [[Weimer-Jehle & Kosow, 2011](#), [Weimer-Jehle, 2008](#)]. Auch unterschätzen die Autoren den Umfang modellgestützter und überhaupt empirischer politikwissenschaftlicher Forschung, wenn sie diese auf „*qualitative insights and implicit mental models produced by experts*“ reduzieren und daraus zu Unrecht ein grundlegendes Problem für den sozialwissenschaftlichen Einsatz mathematischer Modelle ableiten wollen [[Weimer-Jehle, 2008](#)]⁴. Ein Ziel innovativer Energieszenarien sollte es daher sein, die interdisziplinäre „Sprachlosigkeit“ in der Szenarienentwicklung zu überwinden und zugleich den Umfang der berücksichtigten politikwissenschaftlichen Faktoren auszuweiten. Um den möglichen politikwissenschaftlichen Beitrag zu untersuchen, sollen in der Folge zunächst die vorliegenden politikwissenschaftlichen (Energie-)Szenarien und Vergleichsstudien kurz beschrieben werden. An die Darstellung der SWOT-Analyse schließt sich dann eine abschließende Bewertung möglicher Beiträge der STE-Szenarien an.

⁴ Tatsächlich gibt es einige derartige Modelle, die sich mit Wahlverhalten, politischen Entscheidungsprozessen aber auch den internationalen Beziehungen beschäftigen [Johnson, 1999]. Modelle in dieser Teildisziplin umfassen die gesamte Spannbreite von aggregierten Modellen für das internationale System [Gruhn, 1987] bis hin zu agentenbasierten Simulationen von staatlichem Verhalten [Pepinsky, 2005]. Einzelne Autoren kommen daher, teilweise auch aufgrund der Erfolge des Empirical Implications of Theoretical Models Projekts [Political Science Program of the National Science Foundation, 2002] zu der Einschätzung, dass die Politikwissenschaft sogar weitgehend von der Modellierung dominiert wird [Clarke & Primo, 2007]. Unabhängig davon, ob und wieweit diese Aussage zutrifft, kann festgehalten werden, dass Modellierung eine etablierte Methode in der Politikwissenschaft ist.

4.2. Vorliegende politikwissenschaftliche (Energie-)Szenarien und Vergleichsstudien

Von den verschiedenen EU-Projekten, die (Energie-)Szenarien inventarisieren und vergleichen, sind für diese SWOT-Analyse besonders die Ergebnisse des *Energy Foresight Network* (EFONET, <http://www.efonet.org/>) und der Expertengruppe *Global Europe 2030-2050* (http://ec.europa.eu/research/social-sciences/fwl-experts-groups_en.html) relevant⁵. EFONET vergleicht in seinen Studien verschiedene nationale und internationale Energieszenarien, die über einen Zeitraum von ca. 40 Jahren entstanden sind. Im deutschen Landesbericht wird SZEN2007 mit ENREPIV, der DENA-Netzstudie, der DLR-Leitstudie 2007 und EET2007 hauptsächlich in Hinblick auf Szenarienergebnisse verglichen [Cabrera et al., 2009]. Die in der STE-SWOT-Analyse untersuchten sozialwissenschaftlichen Kriterien werden vom EFONET-Projekt weder hier noch in einer historischen Vergleichsanalyse behandelt, die allerdings ohnehin ausschließlich mathematische Modelle als methodisches Bewertungskriterium berücksichtigt [Panzer et al., 2009]. Auch Dogan Keles, Dominik Möst und Wolf Fichtner vergleichen technisch-wirtschaftliche deutsche Energieszenarien, wobei sie konkret die Ölpreisvariante von ENREP IV, das Leitszenario 2007 des BMU, die Wasserstoffstudie der DENA und die Variante mit Laufzeitverlängerung von EW12008 berücksichtigen. Neben grundlegenden methodischen Kritikpunkten an der Szenarienformulierung benennen sie Sensitivitätsanalysen für die exogenen Szenarientreiber, beispielsweise die Rohstoffpreise, als einen Ansatzpunkt für innovative Weiterentwicklungen [Keles et al., 2011]. Die Studie der Expertengruppe *Global Europe 2030-2050* bezieht sich ausdrücklich auf sozialwissenschaftliche Szenarien, aus denen sie ein gemeinsames Trendszenario ableitet. Zwar geht auch diese Studie in erster Linie inhaltsanalytisch vor und sucht zunächst nach Politikthemen, die durch Foresight-Aktivitäten Legitimität und Aufmerksamkeit erhalten haben. Daneben nennt sie aber auch acht methodische Bereiche, in denen die untersuchten Szenarien Verbesserungsmöglichkeiten zeigen. Dies sind im Einzelnen die Folgenden: Analyse und Einbindung von Akteuren, die genauen Beziehungen zwischen sozialen Strukturen und Akteuren, die geographischen und regionalen Szenariengrenzen, die verschiedenen Aspekte des *horizon scanning* - also die kontinuierliche, systematische Suche nach neuen Entwicklungen, Trends und Schlüsselakteuren -, die Wirtschaftsstruktur des Jahres 2030 und inhaltliche Themen, die in den Szenarien nicht berücksichtigt werden [Braun, 2010b]. Aufgrund der großen Zahl der berücksichtigten Szenarien kann vorerst angenommen werden, dass die Bearbeitung dieser „Schwächen“ einen innovativen Forschungsbeitrag leisten kann. Trotz der großen Fallzahl stellt sich allerdings die Frage, wie repräsentativ die Datenlage ist, auf der diese Ergebnisse beruhen. So wird die deutsche Szenarienlandschaft mit lediglich zwei Studien - *Stadt 2030* [Göschel, 2003] und eine 2010 veröffentlichte vorläufige Fassung von SRU2011 – nur punktuell berücksichtigt [Braun, 2010a].

⁵ Daneben gibt es die European Foresight Platform (<http://www.foresight-platform.eu>) als Plattform zur Vernetzung von Projekten und Forschern zu Foresight-Aktivitäten, sowie eine Reihe von Projekten zur Entwicklung langfristiger Modelle für die Zeit nach 2050 (<http://www.vleem.org/index.html>; <http://www.pact-carbon-transition.org/index.html>) sowie Modelle, Simulationen und Szenarien zur Fragen der Energieversorgungssicherheit (<http://www.polinares.eu/>), zu den Wechselwirkungen zwischen Energiesystemen und der Umwelt (<http://www.pashmina-project.eu/>) sowie zu Wahrnehmungen und sozialer Akzeptanz von Nachhaltigkeitsinstrumenten (<http://www.kwi-nrw.de/home/projekt-76.html>). Ergebnisse dieser Projekte liegen vor oder werden für 2011 erwartet und können damit für die Helmholtzszenarien berücksichtigt werden.

Im deutschen Sprachraum liegen besonders zwei politikwissenschaftliche Energieszenarien vor: Die *Stiftung Wissenschaft und Politik* beschreibt zusammen mit der *Daimler Stiftung* verschiedene Pfade, entlang derer sich die Rahmenbedingungen für die Energiesicherheit der EU bis zum Jahr 2030 entwickeln können [[Schröder & Tull, 2008](#)]. Die Projektgruppe *Global Governance 2020* entwickelt unterschiedliche Szenarien zu der Frage, wie eine internationale Klimaschutzpolitik institutionell umgesetzt werden wird [[Au et al., 2011](#)]. Beide Szenarien verwenden die *Cross-Impact-Matrix* Methode [[Gordon & Hayward, 1968](#)], die sie mit *Delphi*-Instrumenten der Expertenbefragung [[Dalkey, 1969](#)] verbinden. Beide formulieren aufgrund ihrer Ergebnisse konkrete Politikempfehlungen. Keine von ihnen berücksichtigt die hier analysierten modellgestützten Energieszenarien, und können damit auch den trotz der methodischen Unterschiede bestehenden Mehrwert einer interdisziplinären Szenarienformulierung nicht realisieren.

4.3. Wirtschaftswissenschaftliche Fundierung der Szenarien

Die modernen Wirtschaftswissenschaften haben sich mehr oder weniger seit ihrem Entstehen im späten 18. Jahrhundert mit verschiedenen Aspekten der Nachhaltigkeit beschäftigt. Thomas Malthus, einer der frühen „klassischen“ Ökonomen, sorgte sich um den drohenden Konflikt zwischen einer ständig wachsenden Bevölkerung und der begrenzten Fläche an landwirtschaftlich nutzbarem Land in Großbritannien [[Malthus, 1826](#)]. Auch wenn die von Malthus befürchteten Hungersnöte dank technischer Fortschritte nicht eingetreten sind, tauchten die speziellen Probleme der natürlichen Ressourcen, ihrer begrenzten Verfügbarkeit und ihrer Nutzung über längere Zeiträume immer wieder in den Wirtschaftswissenschaften auf. Auf den Arbeiten von Pigou und Coase wurde das Feld der Umweltökonomie aufgebaut [[Pigou, 1932](#), [Coase, 1960](#), [Sturm & Vogt, 2011](#)], in den 1970er Jahren entstand unter dem Eindruck der Ölkrise die Ressourcenökonomie [[Solow, 1974](#), [Stiglitz, 1976](#), [Dasgupta & Heal, 1974](#)], und Ende der 1980er Jahre wurde im Zuge der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Ökonomen und Naturwissenschaftlern das Feld der Ökologischen Ökonomie geboren [[Costanza et al., 2001](#), [Daly, 2007](#)]. Im Rahmen der Nachhaltigkeitsforschung fand auch die ökonomische Wachstumstheorie einige Beachtung, die stark von Robert Solow beeinflusst wurde, der wiederum auch die Grundlagen der Ressourcenökonomie entscheidend prägte [[Solow, 1956](#), [Solow, 1957](#), [Solow, 1974](#)].

Angesichts der beträchtlichen wirtschaftswissenschaftlichen Literatur zu Fragen der Umweltnutzung und dem konfliktreichen Spannungsbogen zwischen Wirtschaftswachstum, Ressourcenknappheit, Emissionen und Entsorgungsfragen ist es relativ überraschend, dass sich in den oben beschriebenen Energieszenarien nur wenige Anknüpfungspunkte zu dieser Literatur finden. Als Beispiel sei ein klares Verständnis des Begriffs der „Nachhaltigkeit“ genannt. Zwar finden sich in der ökonomischen Fachliteratur unterschiedliche Interpretationen dieses Leitbilds, aber für jede Interpretation existiert eine klare und eindeutige Definition [[Perman et al., 2003, Kap. 4](#)]. So wird etwa die „schwache Nachhaltigkeit“ definiert durch die Bedingung, dass der Nutzen des repräsentativen Individuums im Zeitverlauf nicht abnehmen darf. Die „starke Nachhaltigkeit“ dagegen erfordert die Erhaltung des natürlichen Kapitalstocks. Aus beiden Konzepten ergeben sich natürlich zahlreiche methodische Fragen, beispielsweise zur Messbarkeit von Nutzen und natürlichem Kapitalstock. Auch ethische Probleme werden aufgeworfen, da in der Realität das „repräsentative Individuum“ nicht existiert und eine Gewichtung der Interessen verschiedener Individuen vorgenommen werden muss. Diese Fragen sind in der ökonomischen Literatur vielfach diskutiert worden; die dabei gewonnenen Einsichten werden aber in den hier

besprochenen Energieszenarien kaum aufgenommen. Stattdessen wird in vielen Fällen von Nachhaltigkeit gesprochen, ohne dass der Begriff näher definiert würde, was aus wirtschaftswissenschaftlicher Sicht nicht zufriedenstellend ist. Ein Kriterium für ein aussagekräftiges Szenario sollte deswegen die Entwicklung eines *konsistenten Nachhaltigkeitskonzeptes* und eine darauf aufbauende *Bewertung* des Szenarios aus Nachhaltigkeitssicht sein.

Aus dem häufig unklaren Nachhaltigkeitsbild ergeben sich weitere Lücken. So werden mehrere zentrale Aspekte der wirtschaftlichen und sozialen Nachhaltigkeit, wie zum Beispiel Beschäftigung/Arbeitslosigkeit und die Verteilung des Einkommens innerhalb einer Generation, in den meisten Szenarien nicht oder nur am Rande thematisiert. Die ökonomische Literatur hat sich ausgiebig mit den Zusammenhängen und Konflikten zwischen umweltpolitischen und wirtschaftspolitischen Zielen beschäftigt; quantitative Modelle zur Beschreibung dieser Zusammenhänge existieren [[Kronenberg, 2007](#)]. Ein weiteres Kriterium bei der Bewertung von Energieszenarien sollte deswegen die Verwendung von *gesamtwirtschaftlichen Modellen* sein, die dem aktuellen Forschungsstand entsprechen und die Wechselwirkungen zwischen den Energiemärkten und den wichtigsten makroökonomischen Größen (BIP, Beschäftigung, Einkommensverteilung) beschreiben.

Neben der makroökonomischen Ebene ist schließlich auch die mikroökonomische Analyse von großer Bedeutung. Die Mikroökonomie widmet sich vor allem dem Verhalten von einzelnen Akteuren (Haushalten, Firmen) in Abhängigkeit von den Anreizen, die ihnen von den Märkten und der Politik geboten werden. Ein aussagekräftiges Szenario sollte deswegen die *Maßnahmen* beschreiben, mit denen die im Szenario angenommenen Entwicklungen umgesetzt werden. Aus wirtschaftswissenschaftlicher Sicht zählen dazu vor allem wirtschaftspolitische und rechtliche Maßnahmen wie etwa Steuern auf umweltbelastende Produkte, die Erteilung von handelbaren Emissionszertifikaten, direkte Regulierungen wie z.B. die Pflicht zum Einbau von Katalysatoren und vieles mehr.

5. SWOT-Analyse

Aufbauend auf den vorangegangenen Ausführungen wird im Folgenden eine SWOT-Analyse durchgeführt, um die Szenarien anhand einer Reihe von Kriterien zu bewerten und einzuordnen. Die Kriterien wurden unter Berücksichtigung der oben ausgeführten Argumente entwickelt. Im Einzelnen wurden die folgenden Kriterien verwendet:

- 1) **Methodische Fundiertheit:** Werden alle relevanten Aspekte mit adäquaten Methoden (z.B. Modellen) abgehandelt? (s. Abschnitt 4.3)
- 2) **Transparenz von Methoden und Daten:** Sind die Methoden und Daten nachvollziehbar? Sind sie transparent dargestellt?
- 3) **Rahmenszenarien:** Werden konsistente Rahmenszenarien (z.B. Entwicklung der weltweiten Energiemärkte und Klimapolitik) aufgebaut?
- 4) **Akteure, Verhalten, Institutionen:** Werden Akteure und ihre Verhaltensweisen realistisch dargestellt? Wird der Einfluss von Institutionen berücksichtigt?
- 5) **Maßnahmen:** Werden Maßnahmen zur Erreichung der beschriebenen Entwicklung (z.B. Effizienzgewinne im Gebäudesektor) vorgeschlagen und analysiert? (s. Abschnitt IV.3)

- 6) **Nachhaltigkeitskonzept und -bewertung:** Wird ein wissenschaftlich fundiertes Nachhaltigkeitskonzept verwendet? Wird darauf aufbauend eine Nachhaltigkeitsbewertung vorgenommen? (s. Abschnitt 4.3)

5.1. Ergebnisse

5.1.1. Methodische Fundiertheit

Die Stärken und Schwächen von Studien sind häufig eng verknüpft mit den Stärken und Schwächen des methodischen Vorgehens und - sofern vorhanden - verwendeter Modelle. Obwohl es sich bei allen betrachteten Studien um Studien mit Energiebezug handelt, muss dabei die Systemweite der einzelnen Studien berücksichtigt werden. So beschränken sich einige Studien auf die Betrachtung einzelner Sektoren, wie z.B. dem Verkehrssektor in ShellPKW. In einem solchen Fall kann es durchaus akzeptabel sein, auf die Betrachtung anderer Sektoren zu verzichten, sofern keine intersektoralen Zusammenhänge und Einflüsse bestehen. In anderen Fällen ist die detaillierte Betrachtung von verschiedenen Sektoren unumgänglich, um fundierte Aussagen treffen zu können, beispielsweise bei Analysen des gesamten Energiesystems. Die Bewertungskriterien für die methodische Fundierung für die Systembereiche Energiesystem, Strommarkt, Stromnetz sowie Makroökonomie sind in Abb. 6 dargestellt. Es wird je nach Detaillierungs- und Komplexitätsgrad in die Gruppen „-: Nicht berücksichtigt“, „X: Berücksichtigt, aber nicht methodisch ausgearbeitet“, „○: Einfache methodische Ausarbeitung“ sowie „●: Komplexe methodische Ausarbeitung“ unterschieden.

Wird z.B. ausschließlich der Stromsektor untersucht und die Auswirkungen auf das weitere Energiesystem vernachlässigt, wie dies beispielsweise in den Studien SRU2011 oder IWES2009 der Fall ist, folgt für die Kategorie Energiesystem die Bewertung „-“. Studien, in denen Auswirkungen qualitativ in Form von Expertenwissen angegeben werden, Beispiele für die Kategorie Energiesystem hierzu sind EWI2008 oder BMU2008, erhalten die Bewertung „X“. Bei der Verwendung von Teilmodellen, Trendfortschreibungen oder Lernkurven ergibt sich die Bewertung „○“. Zu dieser Gruppe zählt für die Kategorie Energiesystem bspw. die Studie FVEE2010. Die Bewertung „●“ setzt eine fundierte methodische Ausarbeitung voraus. Im Bereich des Energiesystems gilt dies vor allem für Energiesystemmodelle wie z.B. IKARUS-LP in Pol IV – V, das Zukunftsenergiemodell ZEN in Ffe2009, TIMES PanEU in IER2009 oder das PRIMES-Modell in EET2009.

Eine besonderer Fokus bei der Analyse der betrachteten Studien liegt auf der Behandlung des Stromsektors, da dieser Bereich mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien sowohl bereits heute als auch zukünftig einem besonders starken Wandel unterliegt. Beim Stromsektor wird hier zwischen dem Strommarkt sowie dem Stromnetz unterschieden. Die Bewertung „-“ erfolgt im Bereich Strommarkt für Studien, die gar keine Betrachtung des Sektors vornehmen, bspw. ShellPKW und ShellLKW. Studien wie ESSO2009, in denen qualitativ auf Auswirkungen auf den Strommarkt eingegangen wird, werden mit „X“ gekennzeichnet. Einfache Strommarktmodelle, die z.B. auf Trendfortschreibungen oder Lernkurven beruhen oder einen geringen Detaillierungsgrad aufweisen, erhalten die Bewertung „○“. Hierzu gehört u.a. das KODARES-Modell in BMU2009. Komplexe Strommarktmodelle mit hoher zeitlicher Auflösung, hohem technischen Detaillierungsgrad und der Abbildung von Marktmechanismen erhalten die höchste Bewertung „●“. Beispiele hierzu sind das Modell E2M2 in IER2009, SimEE in UBA2010 sowie BMU2010, Remix in BMU2010 und SRU2011 oder auch DIME in SZEN2010.

Gruppe	Energiesystem	Strommarkt	Stromnetz	Makroökonomie
- (0) Nicht berücksichtigt	Auswirkungen auf das Energiesystem als Ganzes werden vernachlässigt.	Auswirkungen auf den Strommarkt werden nicht betrachtet.	Auswirkungen auf das Stromnetz werden nicht betrachtet.	Makroökonomische Auswirkungen werden nicht betrachtet.
X (1) Berücksichtigt, aber nicht methodisch ausgearbeitet	Auswirkungen auf das Energiesystem als Ganzes werden anhand von Expertenwissen qualitativ beschrieben.	Auswirkungen auf den Strommarkt werden anhand von Expertenwissen qualitativ beschrieben.	Auswirkungen auf das Stromnetz werden anhand von Expertenwissen qualitativ beschrieben.	Makroökonomische Auswirkungen werden anhand von Expertenwissen qualitativ beschrieben.
o (2) Einfache methodische Ausarbeitung	Einfache Berücksichtigung von Einflüssen auf das Energiesystem, z.B. anhand von Trendfortschreibungen und/oder Teilmodellen.	Der Strommarkt wird anhand eines einfachen Modellansatzes (z.B. geringe zeitl. Auflösung, grobe Technologie-struktur, fehlende Abbildung von Marktmechanismen) oder anhand von Trendfortschreibungen und Lernkurven untersucht.	Auswirkungen werden anhand eines einfachen Stromnetzmodells (grobe Auflösung, Berücksichtigung weniger technischer Parameter, usw.) untersucht.	Einfache Berücksichtigung von Einflüssen anhand von Trendfortschreibungen und/oder Teilmodellen.
• (3) Komplexere methodische Ausarbeitung	Fundamentales Energiesystemmodell.	Komplexes Strommarktmodell.	Detailliertes Stromnetzmodell.	Komplexe makroökonomische Wirkungsanalyse.

Abbildung 6: Konkretisierte Bewertungskriterien zur methodischen Fundiertheit (1)
(Quelle: eigene Darstellung) IEK-STE 2012

Im Bereich der Stromnetze führt eine gänzliche Vernachlässigung des Netzes zu der Bewertung „-“. Ein Beispiel hierzu sind die Studien Pol IV und Pol V. Die Kennzeichnung „X“ steht für Studien, in denen anhand von Expertenwissen auf das Netz eingegangen wird oder zu mindestens Annahmen für das zukünftige Stromnetz genannt werden. Beispiele sind die Studien FVEE2010 oder SRU2011, in denen schlichtweg von einem barriere- und engpassfreien Stromnetz ausgegangen wird oder auch die Studie BMU2010, in der qualitativ

angegeben wird, dass die Netze zukünftig ausgebaut werden müssen. Vereinfachte quantitative Stromnetzmodelle wie in Ffe2009, in der eine verbrauchsspezifische Verlustkennzahl eingeführt wird, werden mit „○“ bewertet. Detaillierte Stromnetzmodelle erhalten die Bewertung „●“, im Rahmen der betrachteten Studien wird diese Wertung jedoch nicht erreicht.

Von besonderem Interesse bei Szenarien sind die Auswirkungen von Transformationsprozessen auf die Volkswirtschaft und deren Rückwirkung. Inwieweit diese Auswirkungen betrachtet werden, wird in der Kategorie „Makroökonomie“ analysiert. In einigen Studien, z.B. UBA2010 oder SRU2011, werden diese Aspekte überhaupt nicht berücksichtigt, demzufolge resultiert in solchen Fällen die Bewertung „-“. Vielfach werden die Auswirkungen jedoch punktuell oder grob vereinfacht anhand von Expertenwissen diskutiert (Bewertung „X“). Beispiele hierzu sind die Studien STE2009 oder auch Pol IV und Pol V. Die Bewertung „○“ ist für vereinfachte makroökonomische Modelle vorgesehen, hierzu zählt z.B. die Studie FVEE2010, in der eine Differenzkostenbetrachtung des erwarteten Mengengerüsts vorgenommen wird. Komplexere makroökonomische Modelle werden mit „●“ bewertet. Beispiele für diese Kategorie sind das NEWAGE-Modell in IER2009, das Strukturmodell EEFA in EWI2008 oder auch PANTA RHEI in SZEN2010.

Gruppe	Haushalte	GHD	Industrie	Verkehr
- (0) Nicht berücksichtigt	Der jeweilige Sektor wird nicht betrachtet und geht nicht erkennbar als Einflussgröße, z.B. als Nachfragevektor, in die weiteren Betrachtungen ein.			
X (1) Berücksichtigt, aber nicht methodisch ausgearbeitet	Der Sektor wird den Betrachtungen zugrunde gelegt. Entwicklungen der Nachfragen oder ggf. intersektorale Wirkungen werden anhand von Expertenwissen (intern/extern) berücksichtigt.			
○ (2) Einfache methodische Ausarbeitung	Unter Verwendung einfacher Teilmodelle, Trendfortschreibungen oder Lernkurven wird der jeweilige Sektor genauer betrachtet.			
● (3) Komplexere methodische Ausarbeitung	Es existiert ein umfassendes Modell, um Wirkungen auf den Sektor bzw. Auswirkungen durch den Sektor zu untersuchen. Alternativ ist der Sektor ein detailliert modellierter Teil eines komplexen Systemmodells			

*Abbildung 7: Konkretisierte Bewertungskriterien zur methodischen Fundiertheit (2)
(Quelle: eigene Darstellung) IEK-STE 2012*

In Abbildung 7 sind die Bewertungskriterien für die Abbildung der Nachfragesektoren Haushalte, GHD, Industrie sowie Verkehr dargestellt. Analog zu dem Vorgehen in Abbildung 6 führt ein höherer Detaillierungs- und Komplexitätsgrad bei der Berücksichtigung des jeweiligen Sektors zu einer höheren Bewertung.

Die Analyse anhand der genannten Kriterien führt zu der SWOT-Matrix 1/3 in Abbildung 9, in der alle betrachteten Studien berücksichtigt sind.

Es zeigt sich, dass insbesondere im Betrachtungsbereich „Strommarkt“ häufig eine der beiden Kategorien „○“ oder „●“ erreicht wird. Das deutet darauf hin, dass Strommarktmodelle mit einer hohen zeitlichen Auflösung inzwischen zum Stand der Technik gehören. Das gilt insbesondere für Studien, in denen ein zukünftig hoher Anteil an erneuerbaren Energien Bestandteil der Szenarien ist.

Anders sieht es für Stromnetze aus. In den betrachteten Studien wird das Netz zumeist gar nicht oder nur rudimentär berücksichtigt.

Auch im Bereich der volkswirtschaftlichen Auswirkungen von Transformationen des Energiesystems lässt sich beobachten, dass insbesondere in einigen der letzten betrachteten Studien eine makroökonomische Wirkungsanalyse anhand von Modellen bzw. Modellansätzen vorgenommen wird. Bisher sind diese Modelle zumeist der energiesystematischen Analyse nachgeschaltet, so dass diese keinen Einfluss auf das Ergebnis der Energiesystementwicklung nehmen, sondern lediglich die Auswirkungen beschreiben.

Mit welchem methodischen Tiefgang die Endenergiesektoren Haushalte, GHD, Verkehr und Industrie in den Studien behandelt werden variiert beträchtlich, wobei zu beobachten ist, dass im Rahmen einer Studie häufig gleichermaßen detailliert auf jeden einzelnen Sektor eingegangen wird. Das führt entsprechend häufig zu einer einheitlichen Bewertung der einzelnen Sektoren innerhalb einiger Studien. Eine Ausnahme bildet z.B. die Studie ShellPKW, in der ein spezieller Fokus auf dem Verkehrssektor liegt.

Eine Studie, die für jeden Endenergieverbrauchssektor ein detailliertes Modell zur Verbrauchsermittlung einsetzt („●“), ist z.B. „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“ (SZEN2010). Dies gilt auch für weitere Studien, wie z.B. PRIMES2008 oder EET2009, häufig wird jedoch wie in der Studie STE2009 lediglich ein Nachfragevektor für den Endenergieverbrauch der einzelnen Sektoren vorgegeben („X“).

5.1.2 Transparenz von Methoden und Daten

Für die Nachvollziehbarkeit von Analysen und die Interpretation der Ergebnisse ist eine transparente Darstellung von zugrunde gelegten Daten und verwendeten Methoden von entscheidender Bedeutung.

Analog zu dem bisherigen Bewertungsschema wird der Grad der Transparenz gemäß Abbildung 8 in 4 Stufen unterteilt. In Gruppe „-“ werden Studien eingestuft, bei denen gar keine Angaben zur methodischen Vorgehensweise bzw. der genutzten Daten gemacht werden. Von Stufe zu Stufe nimmt der Detailgrad der Transparenz zu. Entsprechend steht Gruppe „●“ für Studien mit sehr detaillierten Angaben zur Vorgehensweise bzw. Datenherkunft. Diese Studien sind dadurch geprägt, dass entsprechende Angaben entweder in einleitenden Kapiteln oder aber in ausführlichen Anhängen zu finden sind.

Die Ergebnisse der Analyse sind den letzten beiden Zeilen in Abbildung 9 zu entnehmen.

Als Beispiel für ein Studie, in der sowohl eine detaillierte Angabe der verwendeten Methoden als auch der verwendeten Daten erfolgt, sei „Politiksznarien für den Klimaschutz IV“ (POLIV) genannt. In Kapitel 3 der Studie, im Vorfeld der Diskussion der eigentlichen Szenarien, werden zunächst demographische, wirtschaftliche und andere Rahmendaten für die Szenarienentwicklung beschrieben. Dabei wird detailliert auf die Herkunft der zugrunde gelegten Daten eingegangen und ebenfalls nachvollziehbar dargestellt, warum man sich für die ausgewählte Datengrundlage entschieden hat. In Kapitel 4 werden dann detailliert das methodische Vorgehen und im speziellen die verwendeten Modelle beschrieben. Da diese

Studie von verschiedenen Projektpartnern durchgeführt wurde, sind auch die entsprechenden Verantwortungsbereiche der einzelnen Partner gekennzeichnet. Auf diese Weise ist es möglich, weitere Informationen zu den einzelnen Teilmodellen anhand von wissenschaftlichen Veröffentlichungen der Projektpartner zu erhalten.

Gruppe	Methodentransparenz	Datentransparenz
- (0) Nicht berücksichtigt	Es werden keine Angaben zur methodischen Vorgehensweise gemacht.	Es wird nicht erläutert ob bzw. welche Daten zugrunde gelegt werden.
X (1) Berücksichtigt, aber nicht methodisch ausgearbeitet	Das methodische Vorgehen kann erahnt werden.	Daten werden angegeben, jedoch Herkunft oder Begründung für Verwendung unklar
o (2) Einfache methodische Ausarbeitung	Grobe Angabe des methodischen Vorgehens	Daten werden angegeben und Datenherkunft sowie Begründung für Verwendung der Daten sind erkennbar.
• (3) Komplexere methodische Ausarbeitung	Detaillierte Angabe des methodischen Vorgehens.	Detaillierte Angabe der verwendeten Daten und Begründung für deren Verwendung

Abbildung 8: Konkretisierte Bewertungskriterien zur Transparenz von Methoden und Daten (Quelle: eigene Darstellung) IEK-STE 2012

Eine Studie, die sowohl in der Kategorie Datentransparenz als auch Methodentransparenz in Gruppe „-“ eingeteilt wurde, ist die „Energieprognose 2009-2030“ von Esso (ESSO2009). Die einzigen Prämissen, die am Anfang der Studie genannt werden, sind angenommene Entwicklungen für das Bruttoinlandsprodukt und die Bevölkerung Deutschlands. Es wird jedoch nicht dargelegt, woher die Daten stammen und warum man sich für diese Datengrundlage entschieden hat. Im Bereich der Datentransparenz wurde auch deswegen nicht zu mindestens eine Einteilung in Gruppe „X“ vorgenommen, da in Hinblick auf die Aussagen wie zum Beispiel zu zukünftigem Primärenergieverbrauch und dem Stromerzeugungsmix ganz wesentliche Angaben, z.B. zu hinterlegten Preisentwicklungen, fehlen. Welche Methoden oder gar Rechenmodelle eingesetzt wurden, um zu den präsentierten Ergebnissen zu gelangen, erschließt sich dem Leser ebenfalls nicht.

Es ist zu beobachten, dass der Leser bezüglich des methodischen Vorgehens bei einigen Studien im Unklaren gelassen wird, so dass es mitunter schwer ist, die Ergebnisse nachzuvollziehen. Gleiches gilt für die zugrunde gelegte Datenbasis.

5.1.3 Szenarienbegründung/ Rahmenszenarien

Die Einbettung in übergreifende Rahmenszenarien verbessert nicht nur die Interpretierbarkeit quantitativer Energieszenarien. Sie ermöglicht es auch, wichtige Treiber der Szenarienformulierung schlüssig aus unterschiedlich wahrscheinlichen Zukunftsentwürfen abzuleiten,

statt die entsprechenden Werte „nur“ ex ante aufgrund individueller Einschätzungen festzusetzen [[International Panel on Climate Change, 2000](#), [Camerer et al., 2005](#)]. Die Einbettung quantitativer Szenarien in solche *storylines* – bzw. allgemeiner die schlüssige Verbindung quantitativer und qualitativer Szenarien(-elemente) für unterschiedliche Ebenen des Energiesystems – ist damit ein entscheidendes Kriterium, um die Qualität vorliegender Energieszenarien zu beurteilen. Die konkreten Bewertungskriterien für die *storylines* werden in Tabelle 3 angegeben.

Betrachtungsbereich	ENREPIV	SZEN2007	EET2007	PoIV	PRIMES2008	ESSO2008	EWI2008	BMU2008	ShellPKW	BMU2009	STE2009	ÖKO2009	Esso2009	PoIV	FIE2009	IWES2009	IER2009	ShellKW	FVEE2010	UBA2010	EET2009	SZEN2010	BMU2010	SRU2011
Energiesystem	X	X	●	●	●	X	X	X	-	X	●	●	X	●	●	-	●	-	○	X	●	○	○	-
Strommarkt	●	●	○	●	○	-	●	○	-	○	○	●	X	●	●	●	●	-	○	●	○	●	●	●
Stromnetz	X	X	○	-	○	-	X	X	-	X	-	X	-	-	○	-	X	-	X	X	○	X	X	X
Makroökonomie	X	X	○	X	○	-	●	○	-	○	X	X	-	X	X	-	●	-	○	-	○	●	○	-
Haushalte	●	●	●	○	●	X	○	X	-	X	X	●	-	○	○	-	○	X	○	X	●	●	X	X
GHD	●	●	●	○	●	-	○	X	-	X	X	●	-	○	○	-	●	X	X	X	●	●	X	X
Industrie	●	●	●	○	●	-	○	X	-	X	X	●	-	○	○	-	●	X	X	X	●	●	X	X
Verkehr	●	●	●	●	●	X	○	X	●	X	X	●	X	●	○	-	○	○	X	X	●	●	X	X
Methodentransparenz	○	○	●	●	●	-	●	○	○	○	-	●	-	●	●	○	●	X	X	X	●	○	○	●
Datentransparenz	●	●	○	●	○	X	●	X	○	X	-	●	-	●	●	○	●	●	○	○	○	●	X	○

Abbildung 9: SWOT-Matrix, Teil 1/3 (Quelle: eigene Darstellung)

IEK-STE 2012

Eine vollständige Übersicht der Bewertungsergebnisse findet sich in Abbildung 10. An dieser Stelle soll besonders auf Szenarien mit komplexer ausgearbeiteten *storylines* eingegangen werden. Dabei wird unterschieden zwischen Rahmenszenarien, die sich auf die weitere internationale Umwelt beziehen und solchen, die mögliche Rahmenentwicklungen für Deutschland beziehungsweise die EU beschreiben. Für die internationale Ebene haben besonders EET2007, PRIMES2008 und ShellPKW komplexere *storylines* formuliert. EET2007 entwirft zwar auch nur ein einziges Rahmenszenario. Dieses wird aber mit den Modellen PROMETHEUS und POLES erarbeitet und ist somit methodisch fundierter als bloße Trendfortschreibungen. PRIMES2008 entwirft insgesamt elf Rahmenszenarien, wobei unterschiedliche Szenarientypen mit variierenden Werten für verschiedene Deskriptoren verbunden werden. Formuliert werden hauptsächlich zwei Trendszenarien mit variierenden Öl- und Gaspreisen sowie sechs Zielszenarien mit variierenden Politikmaßnahmen aus dem Instrumentenbündel *Erneuerbare-Energien-Handel*, *Clean Development Mechanisms* und *Emissionsrechtehandel*. Zusätzlich wird eingemischtes Szenario formuliert, dass die kosteneffiziente Lösung unter hohen Öl- und Gaspreisen sucht, sowie zwei Extremszenarien, bei denen nur eines der beiden berücksichtigten EU-Ziele erreicht wird. In diesen Szenarien

wird also entweder das CO₂-Minderungsziel oder das Erneuerbare-Ausbauziel verfehlt. Shell PKW übernimmt die beiden Rahmenszenarien der Shell Energy Scenarios und verbindet sie mit prognostizierten Trends, die in beiden Szenarien stabil sind – „harte Wahrheiten“ – und mit einem ebenfalls stabilen quantitativen Szenario zu den wichtigen soziökonomischen Rahmendaten. „Scramble“ beschreibt eine Entwicklung, in der Effizienzmaßnahmen einen geringen Stellenwert für die internationale Energiepolitik haben und Entscheidungsträger energiepolitische Fragen erst aufgrund externen Kostendrucks bearbeiten. Eine systematische weltweite Energie- und Klimapolitik wird nicht entwickelt. „Blueprint“ beschreibt dagegen eine Zukunft, in der die internationale Energie- und Klimapolitik planmäßig und koordiniert im Sinne eines nachhaltigen Wandels – der Begriff wird nicht näher erläutert – umgestaltet wird. Obwohl die Shell Energy Scenarios diese Begriffe nicht verwenden, kann Scramble eher als Trend- und Blueprint eher als Zielszenario bezeichnet werden. Beide Rahmenszenarien greifen wiederum Elemente der umfassenderen *Shell Global Scenarios* auf [Shell, 2005].

Tabelle 3: Konkretisierte Bewertungskriterien zur Szenarienbegründung

- (0) Nicht berücksichtigt	Keine Rahmenszenarien
X (1) Berücksichtigt, aber nicht methodisch ausgearbeitet	Rahmenszenarien werden entweder als einheitlicher Trend aus aktuellen Daten entworfen oder aus anderen Studien übernommen. Deskriptoren werden nicht variiert.
○ (2) Einfache methodische Ausarbeitung	Verschiedene Rahmenszenarien werden formuliert. Variation erfolgt nicht über Deskriptoren, sondern über unterschiedliche Annahmen zu zukünftigen Politikinstrumenten
● (3) Komplexere methodische Ausarbeitung	Verschiedene Rahmenszenarien werden formuliert, indem klar definierte Deskriptoren variiert werden.

Quelle: eigene Darstellung

IEK-STE 2012

Insgesamt kann die methodische Fundierung der Rahmenszenarien, besonders für die internationale Umwelt, gegenüber vorliegenden Energieszenarien deutlich ausgebaut werden.

5.1.4 Akteure

Annahmen über Natur und Verhalten der relevanten Akteure in einem Energiesystem schlagen sich in der Formulierung einschlägiger Szenarien und Modelle nieder. So wird ein Modell, das von einem einheitlichen und vollständig rationalen (hyperrationalen) Akteur ausgeht zu anderen Ergebnissen kommen als eines, dass eine Vielzahl beschränkt rationaler Akteure voraussetzt. Zwar hängt das letztendlich gewählte Akteurbild auch von den jeweiligen Szenarientypen und Analyseebenen ab. Dennoch sind komplexere Akteurbilder zur Beschreibung tatsächlichen Verhaltens grundsätzlich besser geeignet.

Komplexere Akteurbilder, die auch nicht-rationalistische Faktoren berücksichtigen, liegen explizit nur in den Studien BMU2008 und 2009 sowie in FfE2009 vor. Die beiden BMU-Studien berücksichtigen zumindest für den Wärmesektor, für den eine Vielzahl von Akteuren unterstellt wird, auch Gewohnheiten und Vorlieben als nicht-rationalistische Faktoren. Verhaltensänderungen erfolgen in diesem Bild nicht nur über veränderte materielle Anreize sondern auch über die Verarbeitung neuer Informationen, beispielsweise und hauptsächlich zum Klimawandel. In FfE2009 ergibt sich die Energienachfrage aus einer Summe von energiebezogenen Sekundärbedürfnissen, die wiederum aus der Bedürfnispyramide nach Maslow abgeleitet werden. Daneben vertreten einige Studien das Bild eines eingeschränkt rationalen Akteurs, der in seiner Kosten-/Nutzenkalkulation bestimmten Grenzen unterliegt. So berücksichtigt EET2007 die Risikoaversion von Akteuren in Risikoprämien, die über subjektive Diskontraten in die Modellierung eingebaut werden. In POLIV wird der Mangel an Informationen, dem die meisten Akteure unterliegen, über eine Unschärferelation im Modell ELIAS berücksichtigt. ÖKO2009 berücksichtigt Verhaltensschwankungen über je einen Zufallseinfluss in jeder der 35 Verhaltensgleichungen und EET 2009 legt der Modellierung ein Akteurverhalten zugrunde, dass auch durch Gewohnheiten, Risikoaversion, Komfort und Trägheit beeinflusst wird. Eingeschränkt rationalistisches Verhalten wird in den vorliegenden Szenarien bereits berücksichtigt und für die Anwendung in Modellen quantifiziert. Eine Synthese der vorliegenden Ansätze, die ein umfassendes Bild der bestehenden Rationalitätsgrenzen bieten würde, steht noch aus⁶.

SWOT-Matrix Teil 2/3	ENREPIV	SZEN2007	EET2007	PoIV	PRIMES2008	ESSO2008	EWI2008	BMU2008	ShellPKW	BMU2009	STE2009	ÖKO2009	Esso2009	PoIV	FfE2009	IWES2009	IER2009	ShellLKW	FVEE2010	UBA2010	EET2009	SZEN2010	BMU2010	SRU2011
Rahmenszenarien international	X	X	•	-	•	-	o	-	•	-	X	X	-	X	X	-	•	-	-	-	X	-	o	-
Rahmenszenarien national (EU)	X	o	-	o	-	o	o	o	-	o	-	o	-	o	•	-	•	X	-	•	o	o	o	•
Akteure und Verhalten	-	-	o	o	-	X	X	•	X	•	-	o	-	-	•	-	-	-	-	-	o	X	X	X
Institutionen	-	-	-	X	X	X	X	X	-	X	-	o	-	o	o	-	-	-	-	-	o	-	X	o

Abbildung 10: SWOT-Matrix, Teil 2/3 (Quelle: eigene Darstellung)

IEK-STE 2012

⁶ In diesem Rahmen sollte auch der mögliche Beitrag jüngerer Erkenntnisse der Neurowissenschaften [Camerer et al., 2005] für die Modellierung geprüft werden.

Tabelle 4: Konkretisierte Bewertungskriterien zum Akteurbild

- (0) Nicht berücksichtigt	Akteure und Verhalten werden nicht ausdrücklich berücksichtigt; oft rein technische Szenarien
X (1) Berücksichtigt, aber nicht methodisch ausgearbeitet	Implizit einheitlich-rationalistischer Akteur
o (2) Einfache methodische Ausarbeitung	Eingeschränkt rationalistisches Akteurbild; Modelle berücksichtigen Eigenschaften wie Unsicherheiten, mangelnde Informationen und Risikoaversion
• (3) Komplexere methodische Ausarbeitung	Nicht (ausschließlich) rationalistisches Akteurbild; nicht-rationalistische Akteureigenschaften werden ausdrücklich berücksichtigt

Quelle: eigene Darstellung

IEK-STE 2012

5.1.5 Institutionen

Institutionen steuern das Verhalten der Akteure, indem sie Anreize setzen und Handlungsoptionen ermöglichen oder verschließen. Sie sind daher unabhängig vom gewählten Akteurbild in jedem Szenario relevant. Zugleich bestimmen Institutionen, wie energiepolitische Entscheidungen getroffen werden, welche Politikinstrumente auf welchen Wegen eingesetzt werden können und wie sich die Kosten und Gewinne einer Maßnahme in der Gesellschaft verteilen. Je systematischer ein Szenario Institutionen berücksichtigt, desto besser kann es also nicht nur tatsächliches Verhalten erfassen, sondern auch mögliche und wahrscheinliche energiepolitische Entwicklungspfade entwerfen.

In keinem der untersuchten Szenarien werden Institutionen und ihre Steuerungswirkung systematisch berücksichtigt. Nur fünf neuere Studien vertreten überhaupt einen Institutionenbegriff, der über das umgangssprachliche Verständnis hinausgeht. Öko2009 berücksichtigt Institutionen als regulatorischen Rahmen der Energiepolitik, blendet sie aber für die Betrachtung der kurzfristigen Wirtschaftsentwicklung ausdrücklich aus. POLIV und FfE 2009 nehmen Institutionen als energiepolitische Anreizsysteme auf, führen aber den Begriff und die Wirkung von Institutionen nicht weiter aus. Ähnlich berücksichtigt auch EET2009 Institutionen als exogene Treiber von Akteurverhalten und Marktprozessen. SRU2011 führt schließlich eine umfassende rechtswissenschaftliche Analyse bestehender Institutionen durch und berücksichtigt sowohl die Wirkung von Institutionen auf die Austragung gesellschaftlicher Konflikte als auch die Wechselwirkungen zwischen konkreter Energiepolitik und institutionellem Rahmen. Obwohl SRU2011 damit den am weitesten entwickelten Institutionenbegriff verfolgt, wird dieser weder systematisch in der Szenarienformulierung berücksichtigt, noch den Politikempfehlungen zugrunde gelegt.

Tabelle 5: Konkretisierte Bewertungskriterien zu Institutionen

- (0) Nicht berücksichtigt	Institutionen werden nicht berücksichtigt.
X (1) Berücksichtigt, aber nicht methodisch ausgearbeitet	Umgangssprachliches Institutionenverständnis, teilweise mit korporativen Akteuren (z.B. BMWi, BMU etc.) und/oder politischen Zielvorgaben gleichgesetzt.
o (2) Einfache methodische Ausarbeitung	Einfacher rationalistischer Institutionenbegriff: Institutionen maximal als externe materielle Einschränkungen und Anreize, die vollständig in Akteurverhalten umgesetzt werden.
• (3) Komplexere methodische Ausarbeitung	Komplexerer rationalistischer Institutionenbegriff ⁷ : Steuerungswirkung von Institutionen wird in der Szenarienbeschreibung berücksichtigt.

Quelle: eigene Darstellung

IEK-STE 2012

Insgesamt werden Institutionen in den vorliegenden Studien kaum berücksichtigt. Auch in Studien mit einem komplexeren Institutionenbegriff unterbleibt eine systematische politikwissenschaftliche Ausarbeitung der Wirkungen auf das Energiesystem. Wesentliche Einflussfaktoren auf zukünftige energiepolitische Entwicklungen werden damit außer Acht gelassen. Energieszenarien, die Institutionen einschließlich ihrer Entwicklung im Zeitverlauf systematisch berücksichtigen, können daher einen großen Beitrag zur gegenwärtigen Publikationslandschaft leisten. Es sollte daher nach Wegen gesucht werden, auf denen es gelingen kann, Institutionen in die Szenarienformulierung, aber auch die eigentliche Modellierung, einzubinden.

5.1.6 Maßnahmen

Ein aussagekräftiges Szenario sollte nicht nur eine bestimmte Entwicklung beschreiben; es sollte auch auf die Maßnahmen eingehen, die dazu erforderlich sind, dass diese Entwicklung eintritt (s. Abschnitt 4.3.). Dies ist insbesondere bei normativen Szenarien der Fall. Für die SWOT-Analyse wurde unterschieden zwischen technischen Maßnahmen und politischen Maßnahmen. Ein Szenario, das nicht auf diese Maßnahmen eingeht, enthält Aussagen wie z.B. „im Gebäudesektor sinkt der Energieverbrauch bis zum Jahr 2050 um x Prozent“. Die Aussagekraft des Szenarios erhöht sich, wenn eine solche allgemeine Aussage durch konkrete technische und politische Maßnahmen begründet wird, z.B. mit der Erläuterung „die Installation von neuen Heizkesseln, Fenstern und Dämmstoffen (technische Maßnahmen) wird im Rahmen des KfW-Gebäudesanierungsprogramms mit Y Millionen Euro pro Jahr gefördert (politische Maßnahme), um den Hausbesitzern einen zusätzlichen Anreiz zur Durchführung dieser Maßnahmen zu geben“. Das Wertungsschema für das Kriterium „Maßnahmen“ ist in Abbildung 11 dargestellt.

⁷ Nicht-rationalistische Institutionen, die auch internalisierte Werte und Normen beinhalten, werden in dieser Analyse bereits bei der Betrachtung des Akteurbilds berücksichtigt.

Gruppe	Technische Maßnahmen	Politische Maßnahmen
- (0) Nicht berücksichtigt	Es finden sich keine Hinweise darauf, dass der jeweilige Faktor in den Szenarien berücksichtigt wird.	
X (1) Berücksichtigt, aber nicht methodisch ausgearbeitet	Erwähnung ausgewählter Maßnahmen; keine tiefere Analyse auf quantitativer Ebene	
o (2) Einfache methodische Ausarbeitung	Zahlreiche Maßnahmen werden diskutiert, einzelne werden quantitativ behandelt	
• (3) Komplexere methodische Ausarbeitung	Detaillierte Modellierung und Beschreibung von technischen Maßnahmen	Detaillierte Modellierung und Beschreibung von politischen, rechtlichen und ökonomischen Maßnahmen

Quelle: eigene Darstellung

IEK-STE 2012

Abbildung 11: Wertungsschema für Kriterium 5

Die Bewertungen, die in den zwei Bereichen dieses Kriteriums erreicht wurden, sind in Abbildung 12 aufgelistet. Es gibt eine Gruppe von Szenarien, in denen die „üblichen“ Maßnahmen (CO₂-Zertifikatehandel, Ausbau der Stromnetze) textlich erwähnt, aber nicht weiter analysiert werden, z.B. ENREPIV. In manchen Szenarien wird eine größere Anzahl von Maßnahmen erwähnt, aber ihre konkreten Auswirkungen werden nicht näher analysiert, z.B. in SZEN2007. In zahlreichen Fällen werden politische Maßnahmen in vereinfachender Weise modelliert, beispielsweise wird anstelle einer detaillierten Modellierung des ETS zur Vereinfachung ein bestimmter Zertifikatspreis unterstellt (EET2007, PolV, FfE2009 und viele andere). Die meisten Szenarien legen ihren Fokus auf eine Gruppe von Maßnahmen. Bei ESSO2008 und ShellPKW liegt beispielsweise der Fokus auf technischen Maßnahmen; es wird keine Analyse von politischen Maßnahmen durchgeführt. Im Kontrast dazu liegt etwa bei EWI2008 der Fokus auf (wirtschafts-)politischen Maßnahmen (ETS, Ökosteuern). Eine vertiefte Analyse von beiden Gruppen (technischen und politischen Maßnahmen) ist nur in wenigen Fällen (PolIV, PolV, IER2009) zu finden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass nahezu alle Szenarien auf technische oder politische Maßnahmen eingehen. Allerdings gelingt es nur in seltenen Fällen, sowohl technische als auch politische Maßnahmen ausgiebig zu analysieren. Der Schwerpunkt bei der Analyse von Maßnahmen weist eine gewisse Korrelation mit den Autorentams der Studien auf. So ist es vermutlich kein Zufall, dass das EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln) sich in EWI2008 vor allem den wirtschaftspolitischen Maßnahmen widmet, wohingegen die vom Fraunhofer IWES (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik) erstellte Studie IWES2008 sich ausschließlich technischen Maßnahmen widmet und nicht auf politische Maßnahmen eingeht. Eine ausgewogene Abdeckung von technischen und politischen Maßnahmen dürfte ein entsprechend zusammengestelltes Autorenteam erfordern.

Bewertungsmatrix Teil 3/3	ENREPIV	SZEN2007	EET2007	PoIV	PRIMES2008	ESSO2008	EWI2008	BMU2008	ShellIPKW	BMU2009	STE2009	ÖKO2009	Esso2009	PoIV	FFE2009	IWES2009	IER2009	ShellLKW	FVEE2010	UBA2010	EET2009	SZEN2010	BMU2010	SRU2011	Auszählung (max. 72)
Technische Maßnahmen	X	o	X	o	-	X	X	o	o	o	o	o	X	o	o	●	o	X	X	o	X	X	o	X	37
Politische Maßnahmen	X	X	o	●	o	-	o	X	X	X	X	X	-	●	X	-	o	X	X	X	●	o	-	●	33
Nachhaltigkeitskonzept	-	-	X	-	-	C	-	X	X	X	-	C	-	-	-	-	X	-	H	H	-	-	H	H	
Nachhaltigkeitsbewertung	Z	-	Z	C	o	-	Z	X	X	X	-	o	-	C	X	-	P	-	H	H	Z	P	H	H	

Abbildung 12: SWOT-Matrix, Teil 3/3 (Quelle: eigene Darstellung)

IEK-STE 2012

5.1.7 Nachhaltigkeitskonzept und -bewertung

Szenarien, die sich am Leitbild der Nachhaltigkeit orientieren, sollten im Idealfall über ein konkretes und eindeutig definiertes Nachhaltigkeitskonzept verfügen, einen entsprechenden Indikatorensatz benennen und darauf aufbauend eine Nachhaltigkeitsbewertung der von ihnen beschriebenen Zukunft durchführen (s. Abschnitt 4.3.). Abbildung 12 zeigt, wie die einzelnen Szenarien in diesem Kriterium bewertet wurden. Dabei ist festzustellen, dass die meisten Szenarien sich in eine relativ kleine Anzahl von Gruppen einordnen lassen.

In einer Gruppe von Szenarien (SZEN2007, STE2009, ESSO2009, IWES2009, ShellLKW) wird die Nachhaltigkeit als solche gar nicht thematisiert; sie taucht allenfalls im Text als Schlagwort auf, spielt aber bei der Erstellung und Interpretation des Szenarios keine entscheidende Rolle. Allerdings werden die CO₂-Emissionen und der Energieverbrauch detailliert beschrieben. Da diese in der Nachhaltigkeitsdebatte eine wichtige Rolle spielen, können die Szenarien als Beitrag dazu gesehen werden, obwohl sie sich nicht direkt mit dem Thema der Nachhaltigkeit auseinandersetzen. Eine weitere Gruppe von Szenarien (ENREPIV, EET2007, EWI2008, EET2009) orientiert sich nicht am Leitbild der Nachhaltigkeit, sondern am „energiepolitischen Zieldreieck“ (Wirtschaftlichkeit, Sicherheit, Umweltverträglichkeit). Diese Szenarien sind in Abbildung 12 mit „Z“ gekennzeichnet. Einige Szenarien nehmen auch eine Nachhaltigkeitsbewertung vor, ohne jedoch ein klares Nachhaltigkeitskonzept definiert zu haben (BMU2008, BMU2009, FFE2009).

Besonders unter den neueren Szenarien gibt es eine Gruppe, die eine bestimmte Interpretation des Nachhaltigkeitsbegriffs zu Grunde legt. Zu dieser Gruppe gehören FVEE2010, UBA2010, BMU2010 und SRU2011. In diesen Szenarien wird vorausgesetzt, dass nur erneuerbare Energien nachhaltig sind, und dass ein höherer Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Energieverbrauch mehr oder weniger automatisch zu „mehr“ Nachhaltigkeit führt (spezielle Probleme wie zum Beispiel die Nachhaltigkeit von Energie aus Biomasse werden gelegentlich

aber diskutiert). Bei diesen Szenarien ist also ein relativ klares Nachhaltigkeitsbild vorhanden, was im Grunde lobenswert ist (sie sind in Abbildung 12 mit „H“ gekennzeichnet). Allerdings handelt es sich dabei um eine Interpretation des Begriffs, die nicht bei allen Forschern auf Einverständnis stoßen dürfte. Außerdem wird kein Bezug zur oben erwähnten Fachliteratur (s. Abschnitt 4.3.) hergestellt. Die einzige Ausnahme ist SRU2011, wo die Autoren sich explizit zum Leitbild der „starken“ Nachhaltigkeit bekennen und dies dann dahingehend interpretieren, dass fossile und nukleare Energieträger niemals nachhaltig sein können und demzufolge ausschließlich erneuerbare Energien dem Leitbild der starken Nachhaltigkeit gerecht werden können. Dieses Nachhaltigkeitskonzept ist in sich schlüssig, wird aber ebenfalls nicht auf universelle Zustimmung treffen.

Schließlich gibt es eine Gruppe von Szenarien (mit „P“ gekennzeichnet), die eine Nachhaltigkeitsbewertung durchführt und dem Problem des Nachhaltigkeitskonzepts damit begegnet, dass sie sich auf politische Ziele (Orientierung an der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung) bezieht und darstellt, welche dieser Ziele erreicht werden bzw. wie groß die Zielabweichung ist.

6. Fazit

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Auswahl von Szenarien für das Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland ausgewertet und gegenübergestellt. Die Auswahl konzentrierte sich auf Szenarien mit einer gewissen politischen Bedeutung, welche direkt von der Bundesregierung oder von anderen energiepolitisch bedeutenden Organisationen in Auftrag gegeben wurden. Die Ergebnisse der Szenarien weisen eine beträchtliche Bandbreite auf. Gewisse Trends wie z.B. eine deutliche Zunahme der Bedeutung von erneuerbaren Energien und eine beträchtliche Verbesserung der Energieeffizienz sind allen Szenarien gemein, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß. Erhebliche Unterschiede bestehen in der erwarteten wirtschaftlichen Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts, das in manchen Szenarien deutlich schneller wächst als in anderen, und in der bis 2030 oder 2050 erreichten Emissionsminderung. Diese Unterschiede resultieren u.a. aus unterschiedlichen Zielvorstellungen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich die in der SWOT-Analyse berücksichtigten Szenarien sehr stark auf technik- und wirtschaftswissenschaftliche Faktoren konzentrieren. Politik- und sozialwissenschaftliche Erkenntnisse werden in den Szenarien bisher kaum oder gar nicht berücksichtigt. Allerdings nehmen auch politikwissenschaftliche Foresight-Aktivitäten die hier untersuchten Szenarien, und technisch-wirtschaftswissenschaftliche Energieszenarien insgesamt, nicht ausdrücklich zur Kenntnis, sodass die beiden Forschungslinien in der deutschen Landschaft unverbunden nebeneinander stehen. Ein naheliegender Mehrwert kann also bereits dadurch erbracht werden, dass politikwissenschaftliche Erkenntnisse und Szenarien mit den etablierten technisch-wirtschaftswissenschaftlichen Foresight-Aktivitäten sinnvoll zusammengeführt werden.

Die methodische Fundierung der meisten Szenarien entspricht in den meisten Fällen dem jeweiligen inhaltlichen Schwerpunkt. In den Bereichen Energiesystem, Strommarkt, Stromnetz und Makroökonomie existieren sehr fortschrittliche Modelle, aber eine modellgestützte Analyse all dieser Bereiche in einem groß angelegten Szenario findet sich bislang nicht. Mehrere Szenarien sind ausdrücklich dafür zu loben, dass die verwendeten Methoden und Daten sehr transparent dargestellt werden, jedoch weisen einige Szenarien erhebliche Defizite im Bereich Transparenz auf.

Rahmenszenarien zur Entwicklung der Weltwirtschaft existieren in den meisten von uns untersuchten Studien nur in Ansätzen oder gar nicht. Hier besteht ein deutlicher Verbesserungsbedarf. Auch die Verhaltensweisen der relevanten Akteure und die Rolle der Institutionen sollten mehr Aufmerksamkeit erfahren; die Annahme eines vollständig informierten hyper-rationalen repräsentativen Akteurs schränkt die Aussagekraft eines Szenarios ein.

Da weder Technik noch Politik allein die Probleme auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung lösen können, sollten fortschrittliche Szenarien sowohl technische als auch politische Maßnahmen und deren Zusammenspiel thematisieren. Die meisten der untersuchten Studien legen ihren Fokus jedoch entweder auf technische oder politische Maßnahmen. Ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn wäre möglich, wenn ein entsprechend zusammengesetztes Team von Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen die gleichwertige Berücksichtigung von technischen und politischen Maßnahmen gewährleisten könnte.

Aus Nachhaltigkeitsperspektive bleibt festzuhalten, dass dem Leitbild der Nachhaltigkeit im Allgemeinen nicht die ihm gebührende Aufmerksamkeit zuteilwird. Bezüge zur einschlägigen Literatur werden nicht hergestellt; der Begriff der Nachhaltigkeit wird meist nur in Verbindung mit CO₂-Emissionen diskutiert. Andere Aspekte der Nachhaltigkeit, wie zum Beispiel die sozialen Aspekte einer modernen Energieversorgung, werden nur in Ansätzen diskutiert. Zukünftige Szenarien sollten deswegen einen stärkeren Bezug zur Nachhaltigkeitsforschung herstellen, eine entsprechende Definition und Operationalisierung von „Nachhaltigkeit“ vornehmen und anhand von adäquaten Indikatoren eine Bewertung der im Szenario beschriebenen Entwicklung durchführen.

Referenzen

AU, B., CONRAD, B., DENG, L., HALE, T., LEIPPRAND, T., ANDRÉ, L., MOORE, S. & WANG, J. (2011) *Beyond a Global Deal. A UN+ Approach to Climate Governance*. Berlin, Global Public Policy Institute.

BMU (2008) *Leitstudie 2008*.

BMU (2009) *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland - Leitszenario 2009*.

BMW (2005) *Energiebericht IV: Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030. Energiewirtschaftliche Referenzprognose*.

BRAUN, A. (2010a) *Inventory of Forward Looking Studies with a focus beyond 2030*. Düsseldorf, European Commission DG Research and Innovation.

BRAUN, A. (2010b) *State of the art of international Forward Looking Activities beyond 2030*. Düsseldorf, European Commission DG Research and Innovation.

CABRERA, J. A., et al. (2009) *Deliverable 2.2. Country Reports*. Brüssel, Energy Foresight Network.

CAMERER, C., LOEWENSTEIN, G. & PRELEC, D. (2005) Neuroeconomics. How Neuroscience Can Inform Economics. *Journal of Economic Literature* 49:1, 9-64.

- CAPROS, P., MANTZOS, L., PAPANDREOU, V. & TASIOS, N. (2008) *Model-based Analysis of the 2008 EU Policy Package on Climate Change and Renewables*, European Commission - DG ENV.
- CLARKE, K. A. & PRIMO, D. M. (2007) Modernizing Political Science: A Model-Based Approach. *Perspectives on Politics*, 5:4, 741-753.
- COASE, R. H. (1960) The Problem of Social Cost. *Journal of Law and Economics*, 3:1, 1-44.
- COSTANZA, R., CUMBERLAND, J., DALY, H. E., GOODLAND, R. & NORGAARD, R. (2001) *Einführung in die Ökologische Ökonomik*. Stuttgart, Lucius & Lucius.
- DALKEY, N. C. (1969) *The Delphi Method: An Experimental Study of Group Opinion*. Santa Monica, The Rand Corporation.
- DALY, H. E. (2007) *Ecological Economics and Sustainable Development: Selected Essays of Herman Daly*. Cheltenham, UK and Northampton, MA, USA, Edward Elgar.
- DANISH SOCIETY OF ENGINEERS (Ed.) (2009) *Future Climate Engineering Solutions*.
- DASGUPTA, P. & HEAL, G. (1974) The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies*, 40, 3-28.
- DLR, FRAUNHOFER IWES & IFNE (2010) *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global: Leitstudie 2010*. Berlin, Studie im Auftrag des BMU.
- EUROPEAN COMMISSION (2008) *European Energy and Transport - Trends to 2030 (Update 2007)*. European Commission, Directorate-General for Energy and Transport.
- EUROPEAN COMMISSION (2009) *EU energy trends to 2030. Update 2009*.
- EWI & EEFA (Eds.) (2008) *Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030*.
- EWI, GWS & PROGNOSE (2010) *Energieszenarien für ein Konzept der Bundesregierung*. Basel, Köln, Osnabrück, Studie im Auftrag des BMWi.
- EWI/PROGNOSE (2007) *Energieszenarien für den Energiegipfel 2007*.
- EXXONMOBIL (Ed.) (2008) *Energieprognose 2008*.
- EXXONMOBIL (2009) *Energieprognose 2009–2030*.
- FFE (2009) *Energiezukunft 2050*. München, Studie im Auftrag von EnBW, E.ON Energie, RWE Power und Vattenfall Europe.
- FRAUNHOFER IWES (2009) *Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche*. Kassel, Studie im Auftrag des Bundesverbands Erneuerbare Energie e.V.
- FVEE (2010) *Energiekonzept 2050: Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien*.
- GORDON, T. J. & HAYWARD, H. (1968) Initial experiments with the cross impact matrix method of forecasting. *Futures*, 1:2, 100-116.
- GÖSCHEL, A. (2003) Der Forschungsverbund "Stadt 2030". *Aus Politik und Zeitgeschichte*, 28, 9-15.

- GRUHN, W. L. (1987) *Appendix I. The GLOBUS Simulation Package*. In BREMER, S. A. (Ed.) *The GLOBUS Model. Computer Simulation of Worldwide Political and Economic Developments*. 777-802, Frankfurt am Main/ Boulder, Campus Verlag/ Westview Press.
- IER, RWI & ZEW (2009) *Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030: Energieprognose 2009*.
- INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2000) *Emission Scenarios*. Cambridge, Cambridge University Press.
- JOHNSON, P. E. (1999) Simulation Modeling in Political Science. *American Behavioral Scientist*, 42:10, 1509-1530.
- KELES, D., MÖST, D. & FICHTNER, W. (2011) The development of the German energy market until 2030-A critical survey of selected scenarios. *Energy Policy*, 39:2, 812-825.
- KRONENBERG, T. (2007) *Reconciling Environmental Conservation with Economic Prosperity: The Feasibility of Double Dividends in the Short and Long Run*. Jülich, Germany, Forschungszentrum Jülich.
- MALTHUS, T. R. (1826) *An Essay on the Principle of Population*. London, John Murray, available from <http://www.econlib.org/library/Malthus/malPlong.html>; accessed 26 October 2011.
- MARKEWITZ, P. & MATTHES, F. C. (Eds.) (2008) *Politiksznarien für den Klimaschutz IV: Szenarien bis 2030*, Jülich, Forschungszentrum Jülich.
- MEINSHAUSEN, M., et al. (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109, 213-241.
- ÖKO-INSTITUT & PROGNOSE (Eds.) (2009) *Modell Deutschland. Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken*.
- PANZER, C., KRANZL, L. & HAAS, R. (2009) *Deliverable 6.1. Evaluation paper - policy brief: Comparative Analysis of past & present energy scenarios*. Brüssel, Energy Foresight Network.
- PEPINSKY, T. B. (2005) From Agents to Outcomes: Simulation in International Relations. *European Journal of International Relations*, 11:3, 367-394.
- PERMAN, R., MA, Y., MCGILVRAY, J. & COMMON, M. (2003) *Natural Resources and Environmental Economics*. Harlow, UK, Pearson Education.
- PIGOU, A. C. (1932) *The Economics of Welfare*. London, Macmillan and Co, available from <http://www.econlib.org/library/NPDBooks/Pigou/pgEW.html>; accessed 26 October 2011.
- POLITICAL SCIENCE PROGRAM OF THE NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (2002) *Empirical Implications of Theoretical Models. Workshop Report*. Directorate for Social, Behavioral and Economic Sciences of the National Science Foundation. www.nsf.gov/sbe/ses/polisci/reports/pdf/eitmreport.pdf, 07/19/11.
- SCHRÖDER, H.-H. & TULL, D. M. (2008) *Europäische Energiesicherheit 2020. Szenarien für mögliche Entwicklungen in Europa und seinen energiepolitisch wichtigsten Nachbarstaaten*. Berlin, Stiftung Wissenschaft und Politik.
- SHELL (2005) *Global Scenarios to 2025*. The Hague, Shell International Limited.

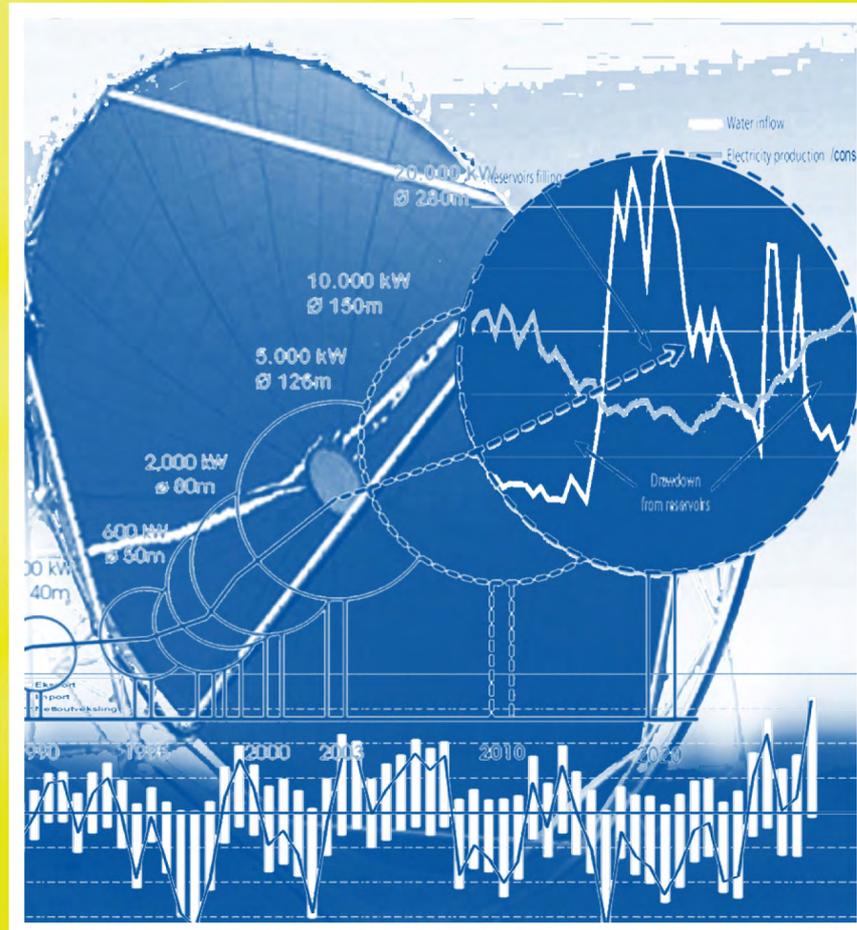
- SHELL (2009) *Shell PKW-Szenarien bis 2030. Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität*. Hamburg.
- SHELL (2010) *Shell Lkw-Studie: Fakten, Trends und Perspektiven im Straßengüterverkehr bis 2030*. Hamburg.
- SOLOW, R. M. (1956) A Contribution to the Theory of Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70, 65-97.
- SOLOW, R. M. (1957) Technical Change and the Aggregate Production Function. *Review of Economics and Statistics*, 39, 312-320.
- SOLOW, R. M. (1974) Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies*, 41:29-54.
- SRU (2011) *Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung*.
- STIGLITZ, J. E. (1976) Monopoly and the Rate of Extraction of Exhaustible Resources. *American Economic Review*, 66:4, 655-661.
- STURM, B. & VOGT, C. (2011) *Umweltökonomik: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Berlin & Heidelberg, Physica-Verlag.
- UBA (2009) *Politiksznarien für den Klima-schutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel: Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030*.
- UBA (2010) Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen.
- WEIMER-JEHLE, W. (2008) Cross-impact balances. Applying pair interaction systems and multi-value Kauffman nets to multidisciplinary systems analysis. *Physica A*, 387:14, 3689-3700.
- WEIMER-JEHLE, W. & KOSOW, H. (2011) *Gesellschaftliche Kontextszenarien als Ausgangspunkt für modellgestützte Energieszenarien*. In DIEKHOF, C., FICHTNER, W., GRUNWALD, A., MEYER, S., NAST, M., NIERLING, L., RENN, O., VOß, A. & WIETSCHER, M. (Eds.) *Energieszenarien. Konstruktion, Bewertung und Wirkung - "Anbieter" und "Nachfrager" im Dialog*. 53-65, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing.

Dr. T. Kronenberg, Dr. D. Martinsen, T. Pesch, M. Sander MA, W. Fischer MA, Prof. J.-Fr. Hake, W. Dr. Kuckshinrichs, Dr. P. Markewitz
 Institut für Energie- und Klimaforschung - Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE)
 Forschungszentrum Jülich GmbH
 Wilhelm-Johnen-Straße
 52428 Jülich
 Deutschland
 Tel. 49 (0) 2461 61 6363
 Fax 49 (0) 2461 61 2496
 E-Mail d.stobbe@fz-juelich.de

Arbeitskreis Energie

Exzerpt aus Tagungsband des AKE, DPG-Tagung 2012 Berlin

home: http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2012-AKE_Berlin/Links_DPG2012.htm



Energiewende

Aspekte, Optionen, Herausforderungen

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Berlin 2012

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Energiewende

Aspekte, Optionen, Herausforderungen

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Berlin, 26. bis 28. März 2012

Programmgestaltung und Herausgeber: Hardo Bruhns

September 2012

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Berlin, 26. bis 28. März 2012

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
Übersicht über die Fachsitzungen	8
Abstracts aller Vorträge	9
Hauptvorträge:	
<i>Wieviel Kohlenstoff braucht der Mensch?</i> , vorgetragen von H. Pütter	24
<i>Virtuelle Großanlagen – ein Ansatz zur systemkompatiblen Integration erneuerbarer Energiequellen in die Energieversorgung</i> , vorgetragen von R. Bitsch	36
<i>Hydro Electricity and Storage Capabilities in Norway – can they be useful for Europe?</i> , presented by W. Rondeel	49
<i>Die Nutzung der Windenergie und erwartete technologische Entwicklungen der nächsten Jahre</i> , vorgetragen von A. Reuter	60
<i>Enhanced Geothermal Systems (EGS) - Potential and Stimulation Treatments</i> , presented by G. Zimmermann	67
<i>Schiefergas: eine unkonventionelle Ressource für den Energiemix der Zukunft?</i> , vorgetragen von A. Hübner	75
<i>Perspektiven für Solarthermische Kraftwerke im Sonnengürtel</i> , vorgetragen von B. Hoffschmidt	81
<i>Windstrom und Wasserstoff – Eine Alternative</i> , vorgetragen von D. Stolten	94

<i>Die Kosten und Risiken der Energiewende</i> , vorgetragen von M. Frondel.....	112
<i>Challenge Energy Transition: Managing Volatility and Integrating Renewables into the Energy System</i> , presented by H. Gassner	124
<i>Energieszenarien für Deutschland: Stand der Literatur und methodische Auswertung</i> , vorgetragen von J. Hake	132
<i>Wie Fukushima die Energiepolitik und Energieforschung in Deutschland und international verändert</i> , vorgetragen von J. Knebel.....	167
<i>Entscheidungszwänge in der Weltenergieversorgung und Klimapolitik bei hoher Unsicherheit</i> , vorgetragen von C. Ch. von Weizsäcker	179
<i>Future Mobility in Europe</i> , presented by F. X. Söldner	183

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2012 -Berlin:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2012-AKE_Berlin/Links_DPG2012.htm

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen von Hauptvorträgen der DPG-AKE Tagung des Jahres 2012 in Berlin zusammen. Die Präsentationsfolien der Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort gelangt man zum Archiv des AKE) eingesehen werden. Allen Autoren, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Düsseldorf, im September 2012

Hardo Bruhns