CLIMATE CHANGE
14/2018

Literaturrecherche zu Studien, die eine Dekarbonisierung der Stromerzeugung und anderer Anwendungsbereiche in Deutschland, Europa und weltweit untersuchen

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 14/2018

Projektnummer 75030
UBA-FB 002650

Literaturrecherche zu Studien, die eine Dekarbonisierung der Stromerzeugung und anderer Anwendungsbereiche in Deutschland, Europa und weltweit untersuchen

von

Matthias Runkel
Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V., Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber:
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft e.V. (FÖS)
Schwedenstraße 15a
13357 Berlin

Abschlussdatum:
August 2017

Redaktion:
Fachgebiet I 2.2 Energiestrategien und -szenarien
Mark Nowakowski

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2018

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Die nationalen und internationalen Energie- und Klimaziele erfordern tiefgreifende Veränderungen, einen strukturellen Wandel und rechtzeitiges politisches Handeln. Eine Vielzahl an Studien beschreibt Szenarien, in denen diese Ziele und eine weitreichende Dekarbonisierung erreicht werden können. Im Rahmen dieses Projekts wurden daher 36 Studien und insgesamt 57 Szenarien untersucht und entlang eines Katalogs an Kriterien systematisch ausgewertet. Die gesammelten Daten wurden in einer Datenbank aufbereitet. Die zentralen Ergebnisse werden in der vorliegenden Analyse beleuchtet.

Der Vergleich der Szenarien verdeutlicht die Handlungsfelder und Hemmnisse des Klimaschutzes und zeigt unterschiedliche Pfade und Strategien auf, die zur Zielerreichung führen könnten. Obwohl sich die Studien zum Teil in ihren Annahmen, der Methodik und den Ergebnissen unterscheiden, zeichnen sich auch einheitliche Trends, Handlungsschwerpunkte und Strategien ab.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Erreichung der vorgegebenen Ziele theoretisch möglich ist, auch wenn einige Autorinnen und Autoren viele Szenarien in Anbetracht der mangelnden Fortschritte für wenig wahrscheinlich halten. Auch unterstreichen die Zielverfehlungen in den Referenzszenarien und Trendfortschreibungen den akuten Handlungsbedarf. Zeitnahe Maßnahmen sind für die meisten Szenarien eine dringend erforderliche Voraussetzung und bringen zum Teil erhebliche Vorteile u. a. in Bezug auf die Erreichbarkeit und die Kosten der Dekarbonisierung.

In fast allen Szenarien sind ambitionierte Fortschritte im Bereich Energieeffizienz ausschlaggebend für die Zielerreichung. Der Energieverbrauch muss so gering wie möglich gehalten werden, um die Anforderungen an den Ausbau der erneuerbaren Energien und damit auch die Kosten und Schwierigkeiten der Dekarbonisierung zu minimieren. Zentral ist in den meisten Szenarien die vollständige Dekarbonisierung des Stromsektors, wodurch auch die nachhaltige Elektrifizierung der Sektoren Verkehr und Wärme ermöglicht wird. Der Stromverbrauch nimmt in vielen Szenarien aufgrund des zusätzlichen Bedarfs beider Sektoren zu, obwohl der Energiebedarf insgesamt häufig sinkt. Die Dekarbonisierung setzt eine weitreichende Elektrifizierung voraus, die im Bereich Verkehr und Wärme aufgrund technischer und struktureller Hürden vor unterschiedlichen Herausforderungen steht.

Abstract

National and international energy goals and climate targets require profound changes, structural transformation and prompt political action. A large number of studies describe and develop scenarios in which these goals and deep decarbonisation can be achieved. In the course of this project, 36 such studies and a total of 57 scenarios were examined and systematically compared along a catalog of criteria. A database was created in order to process and organize the collected data. Central findings are highlighted in the paper at hand.

The comparison of the scenarios highlights various fields of actions and obstacles of climate protection. They show different paths and strategies that support climate compatible developments. Although most studies differ in their assumptions, methodology and results, there are some uniform trends and common areas of action and strategies emerge.

The comparison shows that the achievement of the given goals is theoretically possible, although some authors consider their target scenarios to be rather improbable — considering the lack of progress so far. Additionally, the shortcomings in the reference scenarios and current trends underline the urgent need for action. Timely measures are required in some scenarios and often have considerable advantages with respect to the feasibility and the costs of decarbonisation.

Ambitious advances in energy efficiency are decisive in almost all scenarios. Energy consumption has to be kept as low as possible in order to minimize the challenges of the development of renewable energy and thus the costs and difficulties of decarbonisation. The electricity sector is, in most cases, at the core of this development. Its decarbonisation is a prerequisite for the sustainable electrification of the transport and heating sectors. Electricity consumption is increasing in many scenarios due to the additional needs of both sectors although the overall energy demand is often reduced. Decarbonisation requires extensive electrification, but there remain technical and structural hurdles in transport and heating.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 8
Tabellenverzeichnis 8
Abkürzungsverzeichnis 9
1 Einleitung 10
1.1 Ausgangslage und Zielsetzung 10
1.2 Betrachtete Studien, Datenquellen, Datenermittlung 10
2 Gegenüberstellung der Szenarien 16
2.1 Rahmendaten und Annahmen 16
2.2 Entwicklung der CO_2- und Treibhausgasemissionen 20
2.2.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Sektoren 21
2.2.2 Zentrale Einflussgrößen 23
2.3 Entwicklung des Energiebedarfs und Anteils erneuerbarer Energien 24
2.3.1 Primär- und Endenergieverbrauch 24
2.3.2 EE-Anteil am Endenergieverbrauch 25
2.3.3 Energieverbrauch und EE im Wärmesektor 28
2.4 Entwicklung von Stromverbrauch und -bereitstellung 29
2.4.1 Stromverbrauch 29
2.4.2 Installierte Leistung erneuerbarer Energien 31
2.5 Fazit der Gegenüberstellung und Handlungsansätze 33
3 Dokumentation der Datenbank 35
3.1 Voraussetzungen und Installation 35
3.2 Benutzung 35
3.3 Support 40
4 Quellenverzeichnis 41
5 Anhang 45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bevölkerungsentwicklung (2020=100) 16

Abbildung 2: CO_2-Preis in Euro je Tonne 18

Abbildung 3: Minderung der CO_2-Emissionen ggü. 1990 20

Abbildung 4: Veränderung der CO_2-Emissionen ggü. 1990, weltweit 21

Abbildung 5: Minderung der CO_2-Emissionen in den Sektoren Strom, Wärme, Verkehr (2020=100%) 22

Abbildung 6: Primärenergieverbrauch (PEV) in PJ, Deutschland 24

Abbildung 7: Endenergieverbrauch (EEV) in PJ, EU27 und ASEAN 25

Abbildung 8: Anteil EE am Endenergieverbrauch (EEV), Deutschland 26

Abbildung 9: Anteil EE am Endenergieverbrauch (EEV), international 27

Abbildung 10: Endenergieverbrauch Wärme in PJ, Deutschland 28

Abbildung 11: Stromverbrauch in TWh (brutto und netto), Deutschland 30

Abbildung 12: Nettostromverbrauch in TWh, weltweit im Szenario „advanced energy [r]evolution“ 31

Abbildung 13: Installierte Leistung der erneuerbaren Energieträger in GW, Deutschland 2050 32

Abbildung 14: Installierte Leistung der erneuerbaren Energieträger in GW, EU27+X 2050 33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Betrachtete Studien 12

Tabelle 2: Szenarioziele 45

Abkürzungsverzeichnis

ASEAN	Verband Südostasiatischer Nationen (engl. Association of Southeast Asian Nations)
CCS	CO_2-Abscheidung und Speicherung (engl. carbon capture and storage)
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CO_2äq	Kohlendioxid-Äquivalent
CSP	Solarthermisches Kraftwerk, Sonnenwärmekraftwerk (engl. Concentrated Solar Power)
EE	Erneuerbare Energien
EEV	Endenergieverbrauch
EU27	27 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union
EU27+2	EU27 plus Schweiz und Norwegen
EU-ETS	EU-Emissionshandel (engl. European Union Emissions Trading System)
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GW	Gigawatt
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (engl. Land Use, Land-Use Change and Forestry)
MENA	Nahost und Nordafrika (engl. Middle East & North Africa)
MS	Microsoft
PEV	Primärenergieverbrauch
PJ	Petajoule
PV	Photovoltaik
THG	Treibhausgase
TWh	Terawattstunde

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Um die Ziele nationaler und internationaler Energie- und Klimapolitik erreichen zu können, sind weitreichende Maßnahmen und rechtzeitiges Handeln notwendig. Der Erfolg hängt dabei von sehr vielschichtigen Faktoren und Entwicklungen ab und kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden.

Um Chancen und Risiken zu erkennen und mögliche Pfade, die zur Zielerreichung führen, aufzuzeigen, werden in vielen Studien Szenarioanalysen durchgeführt. Viele Szenarien werden von ihren Autorinnen und Autoren zwar als nicht besonders wahrscheinlich angesehen – etwa wegen der mangelnden Fortschritte. Sie zeigen aber Handlungsmöglichkeiten und Strategien auf, die zur Zielerreichung beitragen können.

Primäres Ziel des Projekts ist es, eine große Anzahl an Szenarioanalysen zur Dekarbonisierung in systematischer Art und Weise vergleichbar zu machen und nebeneinander zu stellen. Zu diesem Zweck wurden relevante Informationen und Daten aus 36 Studien und 57 Szenarien in einer Datenbank zusammengetragen. Folgende vier Schwerpunkte wurden dabei in erster Linie berücksichtigt:

1. Rahmendaten und grundlegende Annahmen der Studien und Szenarien
2. Entwicklung der Treibhausgasemissionen und zentrale Einflussgrößen
3. Entwicklung des Energiebedarfs und des Anteils erneuerbarer Energien
4. Entwicklung des Strombedarfs und der installierten Leistung erneuerbarer Energien

Die zentralen Werte, Annahmen und Ergebnisse werden in der vorliegenden Analyse entlang der vier Schwerpunkte gegenübergestellt. Es wird aufgezeigt, inwiefern sich die Szenarien in Bezug auf einen Katalog von Kriterien unterscheiden bzw. ähneln und welchen Einfluss diese Unterschiede oder Ähnlichkeiten auf die Analyseergebnisse haben. Es wird herausgestellt, wie groß die Varianz der Ergebnisse zwischen den Studien und Szenarien ist und inwiefern es ggf. einheitliche Trends und Entwicklungen gibt.

Im Folgenden werden zunächst die betrachteten Studien, Datenquellen sowie die Datenermittlung beschrieben (Kapitel 1.2). Die Gegenüberstellung der Szenarien erfolgt in Kapitel 2 entlang der vier Schwerpunkte. Die gesammelten Daten und Informationen wurden im Rahmen des Projekts in einer Datenbank aufbereitet. Eine Dokumentation der Datenbank mit Einführung in die Funktionsweise findet sich in Kapitel 3.

1.2 Betrachtete Studien, Datenquellen, Datenermittlung

Im Rahmen des Projekts wurden 36 Studien untersucht und daraus 57 Szenarien (von über 150) genauer betrachtet. Zielsetzung war es, die Szenarien auszuwählen, in denen entweder 1) der Bedarf an Elektrizität zu einem wesentlichen Teil (mindestens rund 90 %) aus erneuerbaren Energiequellen gespeist wird und bzw. oder 2) die Treibhausgasemissionen der relevanten Emissionsquellen um mindestens 90 % gegenüber 1990 gesenkt werden. Es wurden ausschließlich Studien aus dem Zeitraum seit einschließlich 2010 berücksichtigt.

Für die Gegenüberstellung der Szenarien wurden primär Informationen und Daten für die folgenden Schwerpunkte zusammengetragen:

1. Rahmendaten und grundlegende Annahmen der Studien und Szenarien
2. Entwicklung der Treibhausgasemissionen und zentrale Einflussgrößen
3. Entwicklung des Energiebedarfs und des Anteils erneuerbarer Energien
4. Entwicklung des Strombedarfs und der installierten Leistung erneuerbarer Energieträger

Die betrachteten Studien haben unterschiedliche geographische Abgrenzungen. Es wurden 22 Studien mit nationalem Fokus (davon zehn für Deutschland) aufgenommen. Acht Studien betrachten den europäischen Raum (meist EU27, teilweise mit Erweiterungen), weitere vier unterschiedliche Staatenverbünde (Skandinavien, ASEAN, Mekong-Region, Süd- und Mittelamerika). Zwei Studien haben eine globale Perspektive. Vorzugsweise wurden quantitative Studien mit modell- und simulationsgestützten Analysen aufgenommen. Alle berücksichtigten Studien sowie deren geographische Abgrenzung sind in Tabelle 1 (S. 12) aufgelistet.

Es gilt zu beachten, dass Szenarioanalysen einen möglichen und in sich konsistenten Entwicklungspfad zur Erreichung der vorab definierten Energie- und Klimaschutzziele aufzeigen wollen. Sie stellen keine Prognose dar und sagen auch nichts über die Wahrscheinlichkeit ihres Eintreffens aus. Die Ziele aller betrachteten Szenarien sind in Tabelle 2 im Anhang (S. 45) aufgelistet.

Die Mehrzahl der betrachteten Szenarien ist modellbasiert und verwendet mathematische Optimierungssoftware bzw. Programme zur Analyse des optimalen Energiesystems. In den meisten Fällen wird eine Kostenoptimierung des Transformationspfades bei vorgegebenem Zielwert (z. B. CO_2-Emissionen oder Anteil erneuerbarer Energien) durchgeführt. So können beispielsweise ein kostenminimierter Energiemix identifiziert werden oder verschiedene Strategien für das Energiesystem verglichen werden. Die Programme können meist Angebot, Nachfrage und Kosten sowie in einigen Fällen auch Umweltauswirkungen berücksichtigen. In einigen Studien wird zusätzlich oder parallel eine stündliche (teils auch halb-, zweistündlich o. ä.) Erfüllung der Energiebilanz in einem Strommarktmodell geprüft. Vor allem mit Blick auf die fluktuierenden erneuerbaren Energien kann so die Versorgungssicherheit geprüft werden.

Für die Zusammenstellung der Daten wurden alle Informationen meist direkt aus den Studien entnommen. Im Idealfall existiert ein Datenappendix mit entsprechender tabellarischer Darstellung der Werte. Teilweise mussten Informationen aus dem Fließtext entnommen werden. Frei zugängliches Zusatzmaterial zu Methodik, Annahmen, Daten etc. wurden ebenfalls verwendet. Solches Material existiert z. B. für Australian Energy Market Operator (2013), DLR et al. (2012a), IDDRI/SDSN (2015), Lund et al. (2011), NREL (2012), Pfluger (2014), WWF et al. (2016). Für NREL (2012) wurde darüber hinaus der online verfügbare „Scenario-Viewer“[1] genutzt. Eine hohe Transparenz der verwendeten Daten ist jedoch nicht immer gegeben. In einigen Fällen sind viele relevante Daten nur in graphischer Form dargestellt (u. a. ClimateWorks 2014; Federal Planning Bureau et al. 2013; IVL Swedish Environmental Research Institute 2011; WWF et al. 2016). Fehlten eindeutige Angabe der Werte, wurden diese Daten nicht berücksichtigt. Für Lund et al. (2011) wurde ein wichtiger Background-Report bislang nicht veröffentlicht bzw. ist nicht verfügbar. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Datenlage und Transparenz stark variiert. In einigen Fällen sind daher nur wenige Werte verfügbar und vergleichbar.

In einigen Fällen wurden Werte in andere Einheiten umgerechnet, um Vergleichbarkeit zwischen den Studien herzustellen. Umgerechnete Werte sind in der begleitenden Excel-Datei farblich gekennzeichnet und die Umrechnungsfaktoren ausgewiesen.

[1] Abrufbar unter: www.nrel.gov/analysis/re_futures/data_viewer

Tabelle 1: Betrachtete Studien

Titel der Studie	Jahr	Autorschaft	Länder, Region
Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Energien	2010	UBA	DE
Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung	2011	SRU	DE
Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global	2012	DLR, Fraunhofer IWES, IfnE	DE
100 % erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland	2012	Fraunhofer ISE	DE
Roadmap Speicher	2014	Fraunhofer IWES et al.	DE
Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 - Studie	2014	UBA	DE
Klimaschutz: Der Plan - Energiekonzept für Deutschland	2015	Greenpeace	DE
Was kostet die Energiewende?	2015	Frauenhofer ISE	DE
Klimaschutzszenario 2050 - 2. Endbericht	2015	Öko-Institut, Fraunhofer ISI	DE
Die Energiewende nach COP 21- Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung	2016	Nitsch	DE
100 Per Cent Renewables Study - Modelling Outcomes	2013	Australian Energy Market Operator	AU
Least cost 100% renewable electricity scenarios in the Australian National Electricity Market	2013	Elliston et al.	AU
Pathways to deep decarbonisation in 2050	2014	ClimateWorks	AU
Towards 100% renewable energy in Belgium by 2050	2013	Federal Planning Bureau, ICEDD, vito	BE
Green Energy - The Road To A Danish Energy System Without Fossil Fuels	2010	Danish Commission on Climate Change Policy	DK
Coherent Energy and Environmental System Analysis (CEESA)	2011	Lund, H. et al.	DK
The Energy Report - India 100% Renewable Energy By 2050	2013	WWF, TERI	IN
energy [r]evolution - a sustainable energy outlook for Canada	2010	Greepeace, EREC	CA
Energy Scenario for Sweden 2050 Based on Renewable Energy Technologies and Sources	2011	IVL	SE
Pathways to 2050	2011	AEA	UK
Renewable Electricity Futures Study	2012	NREL	US
Cost-minimized combinations of wind power, solar power and electrochemical storage, powering the grid up to 99.9 % of the time	2013	Budischak et al.	US
Roadmap 2050 - A practical guide to a prosperous, low-carbon Europe	2010	ECF	EU27, NO, CH
RE-thinking 2050 - A 100% Renewable Energy Vision for the European Union	2010	EREC	EU27
Power Perspectives 2030 - On the road to a decarbonised power sector	2011	ECF et al.	EU27, NO, CH
EU Long-term scenarios 2050 - Tangible ways towards climate protection in the European Union	2011	Fraunhofer ISI	EU27, NO, CH
energy [r]evolution - A Sustainable EU 27 Energy Outlook	2012	DLR et al.	EU27
2050 Desert Power	2012	Dii, Fraunhofer ISI	EU, MENA
EU Long-term scenarios 2050 II - Optimized pathways towards ambitious climate protection in the European electricity system	2014	Fraunhofer ISI	EU27, NO, CH
Assessment of least-cost pathways for decarbonising Europe's power supply	2014	Pfluger	EU27, NO, CH
Nordic Energy Technology Perspectives 2016	2016	IEA, Nordic Energy Research	DK, FI, IS, NO, SE

Titel der Studie	Jahr	Autorschaft	Länder, Region
energy [r]evolution - a sustainable ASEAN energy outlook	2013	Greepeace, EREC	ASEAN
Power Sector Vision 2050 - Toward 100% Renewable Energy by 2050	2016	WWF, IES, MKE	Große Mekong-Region
Complementarity of hydro, wind and solar power as a base for a 100% RE energy supply: South America as an example	2015	Breyer et al.	Süd- und Mittelamerika
energy [r]evolution - A Sustainable World Energy Outlook 2015	2015	Greenpeace, Global Wind Energy Council, SolarPowerEurope	Weltweit
Pathways to deep decarbonisation in 2050 - 2015 report	2015	IDDRI, SDSN	AU, BR, CA, CN, FR, DE, IN, ID, IT, JP, MX, RU, ZA, KP, UK, US

Szenariostudien mit städtischer oder regional begrenzter Betrachtung

Neben den nationalen, supranationalen und globalen Szenariostudien werden in der vorliegenden Analyse an einigen Stellen auch die zentralen Ergebnisse von vier Studien mit jeweils auf eine Stadt bzw. Region gerichtetem Fokus betrachtet. Rund die Hälfte der Weltbevölkerung lebt mittlerweile in Städten und verursacht mehr als 70 % der weltweiten Treibhausgasemissionen (PIK et al. 2014). Die CO_2-Emissionen Berlins beispielsweise entsprechen in etwa denen Kroatiens (ebd.). Städte können signifikant zum Klimaschutz beitragen und sind oft Vorreiter. Die Transformation birgt dabei häufig Chancen, Städte dynamischer, zukunftsfähiger und lebenswerter zu machen. Gleichzeitig müssen sich viele Städte und Regionen individuell an Auswirkungen des Klimawandels anpassen.
Die Kernaussagen der vier Studien für die Stadt Seattle, die Stadt Berlin, das Land Bayern und die Region Hannover werden im Folgenden zusammengefasst.

Die Stadt **Seattle** im US-Bundesstaat Washington ist seit vielen Jahren Vorreiter im Klimaschutz und hat sich im Jahr 2010 zur Vision gemacht, die vielleicht erste klimaneutrale Stadt der Vereinigten Staaten zu werden. Zur Vertiefung dieser Vision wurde das „Carbon Neutral Scenario“ (Lazarus et al. 2011) entwickelt, in dem die Treibhausgasemissionen pro Kopf bis 2050 um 90 % gegenüber 2008 reduziert werden können – trotz eines gleichzeitigen Bevölkerungszuwachses um 50 % auf über 900.000 Menschen.
Eine solche emissionsarme Zukunft ist laut den Autorinnen und Autoren erreichbar, die Aufgabe sei aber gewaltig. Drei zentrale Handlungsfelder wurden identifiziert: Verkehrsverlagerung, Energieeffizienz und die Energiesubstituierung bzw. der Einsatz erneuerbarer Energien.
Das Verkehrsaufkommen reduziert sich im Szenario aufgrund der Verkehrsverlagerung drastisch. Die Fahrzeugkilometer pro Kopf im Personenverkehr halbieren sich beispielsweise bis 2050. Dazu ist ein Ausbau des öffentlichen Verkehrs sowie der Fahrrad- und Fußgängerinfrastruktur notwendig. Auch preisliche bzw. finanzielle Anreize (z. B. über *road pricing* oder Parkraumbewirtschaftung) spielen dabei eine Rolle.
Effizienzsteigerungen im Verkehrs- und Gebäudesektor führen dazu, dass der Stromverbrauch trotz Elektrifizierung beider Sektoren nicht zunimmt. Bis 2050 sollen rund 50 % der jeweiligen Energieverbräuche eingespart werden. Im Gebäudesektor kommen außerdem vermehrt Fernwärme und Wärmepumpen zum Einsatz; Gebäudesanierungen und effizientere Neubauten reduzieren den Verbrauch. Im Verkehrsbereich führen insbesondere Effizienzstandards und die Elektrifizierung zu einem Verbrauchsrückgang. Seattle bezieht bereits heute emissionsfreien Strom aus Wasserkraft. Da die Kapazitäten laut den Autorinnen und Autoren zukünftig sinken könnten und der Ausbau alternativer Energieträger begrenzt ist, sind Energieeffizienz- und Energiesparmaßnahmen im Szenario von großer Bedeutung.

Das dritte Handlungsfeld, die Energiesubstituierung durch weniger klimaschädliche Energieträger, baut vor allem auf den Einsatz des bereits heute emissionsfreien Stroms. Der Verkehr wird weitestgehend elektrifiziert. Biokraftstoffe kommen im Personenverkehr nur als Übergangslösung zum Einsatz, im Güterverkehr jedoch auch über 2050 hinaus. Im Gebäudebereich sinkt der Erdgasverbrauch für Raumwärme und Warmwasser zwar deutlich, kann aber nicht gänzlich eliminiert werden, unter anderem aufgrund der bereits bestehenden Gas-Infrastruktur vor allem in neueren Wohnungsbauten. Der Energiebedarf des Sektors wird 2050 dennoch zu weit über 50 % mit Elektrizität gedeckt.

Für **Berlin** wurde unter der Leitung des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) die „Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050“ erstellt (PIK et al. 2014). Berlin soll seine CO_2-Emissionen demnach bis 2050 um 85 % ggü. 1990 reduzieren. Neben einem Referenzszenario, das eine Reduktion von 68 % erreicht, werden zwei Zielszenarien („Die zentrale, effiziente Stadt“ und „Die dezentrale, vernetzte Stadt“) entwickelt, in denen Klimaneutralität erreicht wird. Die Studie betrachtet die Bereiche Energieversorgung, Gebäude und Stadtentwicklung, Wirtschaft, private Haushalte und Konsum sowie Verkehr.
Der Gebäudebereich verursacht rund die Hälfte der Berliner CO_2-Emissionen. Zentrale CO_2-Reduktionspotenziale sehen die Autorinnen und Autoren in der Nachverdichtung, hohen energetischen Neubaustandards, einer höheren Sanierungsrate sowie dem Einsatz von Power-to-Heat. Auch die netzgebundene Wärmeversorgung spielt eine wichtige Rolle.
Die Emissionen des Verkehrs (fast ein Viertel der Emissionen) sollen mithilfe von Vermeidung (z. B. Leitbild „Stadt der kurzen Wege“ und urbane Logistikkonzepte), Verlagerung und dem Einsatz alternativer Antriebe reduziert werden. Notwendig sei eine intermodale Systemlösung, die den Umweltverbund (Fußverkehr, Fahrrad, ÖPNV) gezielt mit modernen Verkehrsformen (Car-/Bikesharing etc.) verbinde.
2010 wurde erst 1 % des Berliner Primärenergieverbrauchs aus erneuerbaren Quellen gedeckt. Im Bereich der Energieversorgung sehen die Autorinnen und Autoren großes Potential in der Solarenergie (vor allem Photovoltaik, aber auch Solarthermie) u. a. auf Dächern und Fassaden, der Nutzung von KWK und Fernwärme sowie Power-to-Heat. Das Windkraftpotential in Berlin ist aufgrund der begrenzt verfügbaren Fläche im Vergleich zu Deutschland insgesamt gering. Der Import von Biomasse in die Stadt ist aus Gründen der Nachhaltigkeit ausgeschlossen.
Einen großen wirtschaftlichen Vorteil als Nebeneffekt des Klimaschutzes sehen die Autorinnen und Autoren in der Vermeidung des Imports fossiler Energieträger. Aktuell werden in Berlin demnach jährlich rund 3,2 Mrd. Euro für diese Zwecke ausgegeben.

Für das Bundesland **Bayern** hat das Leipziger Institut für Energie GmbH (2012) die Studie „Bayerische Energieszenarien 2050“ verfasst und darin die künftige Energieversorgung des Freistaates diskutiert. Die Studie hat das Ziel, die energiewirtschaftlichen Wirkungen des Energiekonzeptes der Bundesregierung sowie des beschlossenen Atomausstiegs für Bayern zu analysieren. Auch das Energiekonzept „Energie Innovativ“ des Freistaats wurde berücksichtigt.
Die Studie betrachtet keine Zielszenarien, sondern leitet Szenarien von verschiedenen politischen Rahmenbedingungen ab. Die zuvor genannten Rahmenbedingungen (Energiekonzepte, Atomausstieg) werden in einem Referenzszenario analysiert. Drei Politikszenarien untersuchen zusätzlich ein Scheitern der internationalen Klimaschutzverhandlungen und die Vorgabe einer autarken Stromerzeugung in Bayern.
Die Studie geht davon aus, dass das CO_2-Reduktionsziel der Bundesregierung (mindestens -80 % bis 2050 ggü. 1990) nicht eins zu eins auf die Bundesländer übertragen wird. Stattdessen erfolgt eine kostenorientierte Lastenverteilung. Die CO_2-Emissionen gehen in den Szenarien daher nur um 34,7 bis 49,3 % zurück. Andere Bundesländer sollen entsprechend mehr leisten, unter anderem weil der CO_2-Ausstoß in Bayern – bezogen auf Einwohnerzahl, Wirtschaftsleistung, je erzeugter Kilowattstunde – bereits heute unter dem bundesweiten Durchschnitt liege.

Im Bereich Wärme sind die erzielbaren Energieeinsparungen in Bayern laut den Autorinnen und Autoren niedriger einzuschätzen als im Rest der Bundesrepublik. Der Wohnungsbestand ist jünger und damit bereits in einem besseren energetischen Zustand. Insgesamt existieren aber auch in Bayern erhebliche Einsparpotentiale und es wird bspw. von einem deutlichen Zuwachs an Wärmepumpen in der Beheizungsstruktur ausgegangen.
Im Bereich Verkehr sind vor allem zwei Trends (Hybridisierung und Urbanisierung) für den Rückgang des Energieverbrauchs verantwortlich. Hybrid-Pkw machen im Jahr 2050 einen Anteil von 64 % an der gesamten Pkw-Flotte aus. Rein elektrische Pkw kommen auf einen Anteil von 20 %. Die Urbanisierung verringert die durchschnittliche Fahrleistung und geht mit einer Verkehrsverlagerung einher.
Der Primärenergieverbrauch ist in allen Szenarien rückläufig und fällt von rund 2.000 PJ im Jahr 2008 auf 1.400 bis 1.500 PJ mit einem EE-Anteil von 36 % im Zieljahr. Aktuell wird die Energieversorgung in Bayern durch die Kernkraft dominiert. Der Umbau der Stromversorgungsstruktur stellt laut den Autorinnen und Autoren daher eine enorme Herausforderung dar. Dazu sind unter anderem ein massiver Ausbau der Wind- und Solarenergie sowie zusätzliche Reserve- und Regelkapazitäten in Form von Erdgaskraftwerken und Energiespeichern notwendig. Eine autarke Stromversorgung ist mit hohem Zubaubedarf verbunden. Die Möglichkeit, Strom zwischen den Bundesländern zu transportieren oder international zu importieren bzw. exportieren, müsse berücksichtigt werden.

Die Regionsversammlung und der Rat der Stadt **Hannover** haben sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um 95 % und den Endenergiebedarf um 50 % ggü. 1990 zu reduzieren. In einem „Masterplan für den Klimaschutz“ (Landeshauptstadt und Region Hannover 2013) wurden dazu Vorschläge und Handlungsempfehlungen erarbeitet. Im Rahmen des Projekts hat das Leipziger Institut für Energie in Zusammenarbeit mit Fachleuten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung verschiedene Trend-, Entwicklungs- und Zielpfade erstellt.
Der Zielpfad zeigt, dass die gesteckten Ziele realistisch erreichbar sind. Voraussetzung dafür sind große Erfolge in der Effizienz sowie beim Ausbau der erneuerbaren Energien (vor allem Wind und Photovoltaik). Darüber hinaus wird von einer höheren Suffizienz ausgegangen, die mit einer geringeren Nachfrage und Verhaltensänderungen einhergeht. Auch die Bevölkerungszahl in den Szenarien ist rückläufig. In der Region Hannover leben aktuell 1,12 Millionen Menschen. Der Rückgang bis 2050 beträgt 8 % und ist weitestgehend auf die Kommunen im Umland zurückzuführen.
Im Gebäudebereich wird der Wärmebedarf bis 2050 mehr als halbiert. Dazu müssen alle bautechnischen Möglichkeiten zur Dämmung und Fenstersanierung sowie Sanierungsquoten genutzt werden. Im Verkehrsbereich zielen die Maßnahmen vor allem auf die Vermeidung von Verkehr ab. Danach folgen die Verkehrsverlagerung und der Einsatz emissionsarmer Technologien. Der Einsatz fossiler Kraftstoffe wird jedoch nicht vollständig verdrängt. Diesel und Benzin (in Hybridfahrzeugen) sowie Kerosin (im Luftverkehr) decken mit 14 % einen nicht unerheblichen Anteil des Energieverbrauchs.
Der Zielpfad setzt auf eine regionale Energiewende. Im Jahr 2050 stammen 45 % des bereitgestellten Stroms aus Windenergie, 44 % sind Solarstrom. Für Bioenergie wird kaum Zuwachspotential gesehen. Strom- und Wärmespeicher sowie die Umwandlung von Strom in Gas (Power-to-Gas) gleichen die schwankende regenerative Stromproduktion aus.
Laut den Autorinnen und Autoren kann die Transformation auf regionaler Ebene nur mit entsprechenden überregionalen bzw. nationalen Rahmenbedingungen und Instrumenten gelingen. Dazu zählen sie unter anderem Verlässlichkeit und Kontinuität der politischen Rahmenbedingungen, Vorbildfunktion und Konsistenz der Landes- und Bundesregierung, Internalisierung der Klimakosten (insb. CO_2-Vermeidungskosten) in (Energie-) Preisen und Instrumentarium zur Eingrenzung von Rebound-Effekten.

2 Gegenüberstellung der Szenarien

Zielszenarien erreichen ihre selbst gesteckten Ziele per Definition. Der Mehrwert einer Gegenüberstellung ergibt sich also vor allem darin, die Strategien, Entwicklungen und Maßnahmen, die zum Ziel führen, vergleichen zu können und gemeinsame Tendenzen, Hemmnisse und Einflüsse zu identifizieren. Die grundlegende Fragestellung lautet also nicht, ob, sondern wie die Ziele erreicht werden.

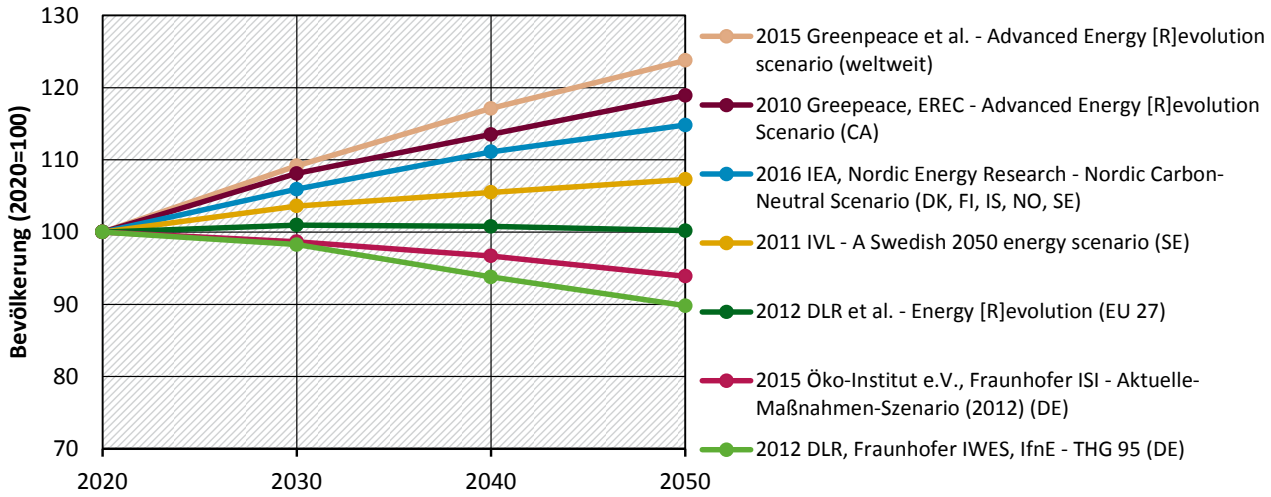
Zunächst werden in Kapitel 2.1 die Rahmendaten und grundlegende Annahmen der Studien bzw. Szenarien verglichen. Annahmen zu Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum und Preisentwicklungen (z. B. für CO_2-Emissionen) werden gegenübergestellt und Auffälligkeiten beschrieben. Ebenso werden eher qualitative Annahmen zum Potential erneuerbarer Energiequellen, zur Energieeffizienz und zum Einsatz von Flexibilitätsoptionen betrachtet. Kapitel 2.2 zeigt die Entwicklung der CO2-Emissionen insgesamt und in den Sektoren Strom, Verkehr und Wärme. Zentrale Einflussgrößen werden herausgestellt und in späteren Kapiteln vertieft. Zentral für die Entwicklung der Emissionen sind u. a. der Bedarf an Energie insgesamt (Kapitel 2.3), der Verbrauch an Strom im speziellen (Kapitel 2.4) sowie jeweils der Beitrag der erneuerbaren Energien (EE).

2.1 Rahmendaten und Annahmen

Bevölkerungsentwicklung

Obwohl die Bevölkerungsentwicklung erheblichen Einfluss auf Energiebedarf, Treibhausgasemissionen etc. hat, finden sich nur in sieben Studien explizite Angaben zur Bevölkerungsentwicklung für den gesamten Zeitverlauf. Häufig stecken die Annahmen jedoch implizit in anderen Rahmendaten z. B. zur Entwicklung des zukünftigen Energie- oder Strombedarfs.

Abbildung 1: Bevölkerungsentwicklung (2020=100)



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

Weltweit wird von einem deutlichen Bevölkerungszuwachs ausgegangen (siehe Abbildung 1). In Greenpeace et al. (2015) wächst die Weltbevölkerung zwischen den Jahren 2020 und 2050 um 24 % auf 9,5 Mrd. Menschen. Ein Zuwachs ist auch für einzelne Länder (z. B. Kanada und Schweden) und Regionen (z. B. Skandinavien) zu beobachten. In der EU hingegen stagniert die Bevölkerungszahl. In Deutschland ist sie in allen abgebildeten Studien sogar rückläufig und liegt 2050 zwischen 72 und 74 Millionen. Zum Vergleich: Im Jahr 2015 lebten rund 82 Millionen Einwohner in Deutschland; der Rückgang bis 2050 beträgt also rund 9 %. Der Trend spiegelt sich auch in den städtischen bzw. regional begrenzten Szenarien wider. Für die Region Hannover wird von einem Bevölkerungsrückgang von 8 %

ausgegangen, der in erster Linie auf Entwicklungen im Umland zurückzuführen ist (Landeshauptstadt und Region Hannover 2013). Auch im Szenario für das Land Bayern schrumpft die Bevölkerung bis 2050 um rund 9 % (Leipziger Institut für Energie 2012). Im Gegensatz dazu wächst Berlin um über 6 % auf rund 3,75 Millionen Einwohner (PIK et al. 2014); die Bevölkerung Seattles nimmt sogar um 50 % zu (Lazarus et al. 2011).

Eine Reduktion des Energiebedarfs und der Treibhausgasemissionen ist unter der Annahme eines Bevölkerungsrückgangs verhältnismäßig einfacher zu erreichen. Viele Länder und die meisten Metropolregionen rechnen jedoch mit einem Bevölkerungszuwachs. Die aktuellen Entwicklungen in Europa durch Flüchtlingsströme sind in den Studien nicht berücksichtigt.

Wirtschaftswachstum

Das zukünftige Wirtschaftswachstum ist unter anderem von der angenommenen Bevölkerungsentwicklung abhängig, so dass hier eine ähnliche Entwicklung unterstellt wird. Global wird häufig von einer durchschnittlichen Wachstumsrate von 3,1 % pro Jahr bis 2050 ausgegangen (siehe z. B. Greenpeace et al. 2015; IDDRI/SDSN 2015). Wachstumstreiber ist dabei z. B. der Verband Südostasiatischer Nationen (ASEAN), dessen Wirtschaft in Greenpeace/EREC (2013) bis 2050 um durchschnittlich 3,4 % pro Jahr wächst. Auch für einzelne Länder und Regionen (u. a. Australien, Schweden und Skandinavien insgesamt) wird von deutlichem Wachstum jenseits von 2 % ausgegangen. Im Vergleich dazu ist das angenommene Wirtschaftswachstum der Europäischen Union mit 1,6 % deutlich schwächer (DLR et al. 2012b). Auffällig sind vor allem die Annahmen mehrerer Studien für Deutschland, die mit 0,7 bis 0,8 % weit unter dem Durchschnitt liegen. Ausschlaggebend hierfür könnten unter anderem die zuvor genannten Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung sein. Auch hier wurde von unterdurchschnittlichem Wachstum bzw. einem Rückgang der Bevölkerung in Deutschland ausgegangen.

Im Vergleich sind die Annahmen der Studien weitestgehend kohärent, und in fast allen Studien verlangsamt sich das Wirtschaftswachstum im Zeitverlauf. Es ist jedoch nicht in allen Fällen klar, ob zwischen nominalem und realem Wachstum unterschieden wird.

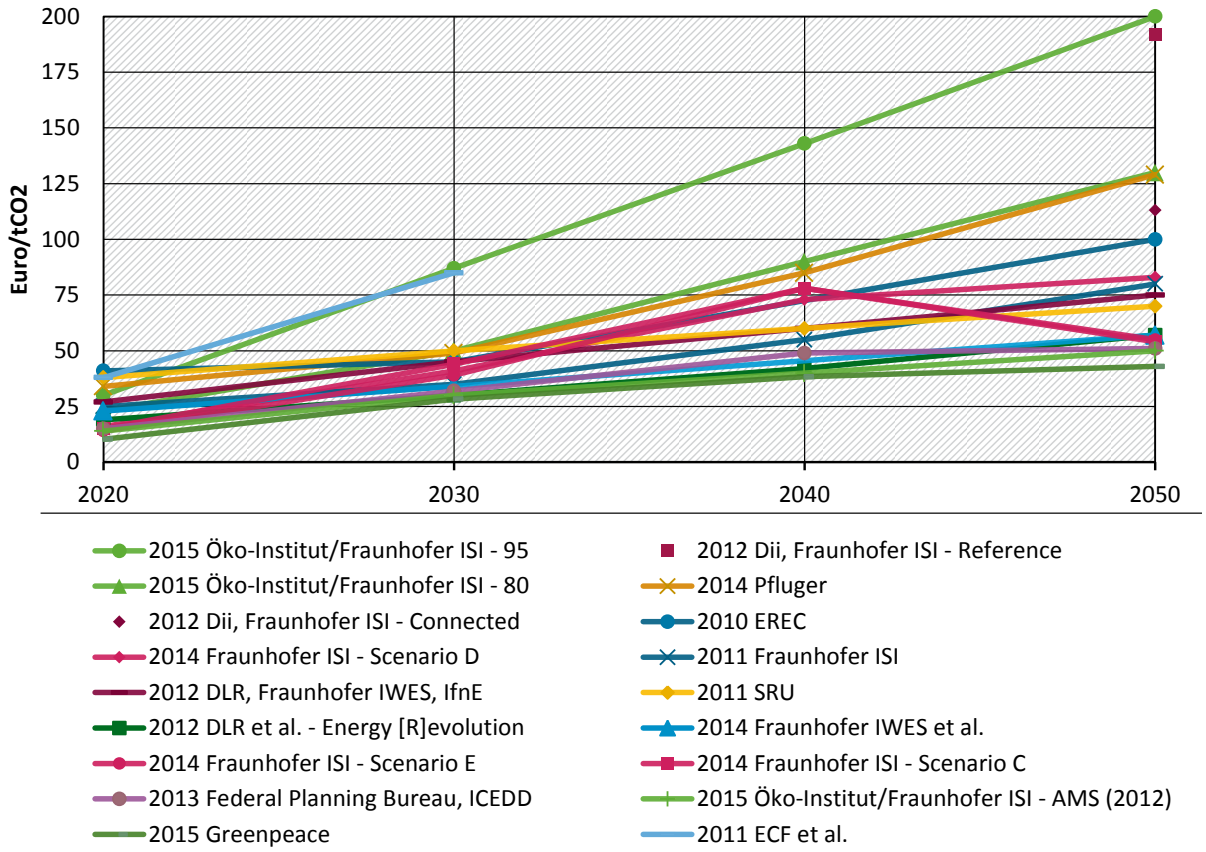
CO_2-Preise

Abbildung 2 verdeutlicht die hohe Unsicherheit bezüglich zukünftiger CO_2-Preise. Einerseits existiert noch wenig historische und empirische Erfahrung, auf die für eine Prognose zurückgegriffen werden könnte. Andererseits wird der Preis stark von Politikentscheidungen beeinflusst, was einen zusätzlichen Unsicherheitsfaktor darstellt. In den meisten Studien ist mit CO_2-Preis der Preis von Emissionszertifikaten in den entsprechenden Handelssystemen gemeint. Die Bepreisung von CO_2 kann jedoch ebenfalls über andere Instrumente erfolgen. In einigen Studien werden beispielsweise eine CO_2-Steuer oder eine entsprechende Ausgestaltung der Energiesteuer berücksichtigt (siehe z. B. Danish Commission on Climate Change Policy 2010). Diese sind vor allem für Sektoren relevant, die von den Emissionshandelssystemen nicht erfasst werden.

In den meisten Szenarien wird der CO_2-Preis exogen festgelegt und hat somit Einfluss auf die Szenarioergebnisse. Eine Ausnahme stellt die Studie von Fraunhofer ISI (2014) dar, in der der CO_2-Preis ein Resultat der exogen festgelegten Emissionsobergrenze für den EU-Emissionshandel ist. Wichtige Einflussgröße ist hier der Strombedarf: Im Szenario D („High Demand“) liegt der Preis im Jahr 2050 aufgrund der höheren Nachfrage mit 83 Euro je Tonne CO_2 deutlich höher (um über 50 %) als in den Szenarien C und E (54 und 55 Euro). Die endogen ermittelten CO_2-Preise aus Fraunhofer ISI (2014) bewegen sich damit im Rahmen der anderen hier dargestellten Szenarien. Die Preise liegen im Jahr 2020 allesamt noch deutlich unter 50 Euro, entwickeln sich danach jedoch sehr unterschiedlich. Im Jahr 2050 nimmt der Großteil der Szenarien einen Preis zwischen 50 und 100 Euro an. Das „Klimaschutzszenario 95“ von Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) stellt einen Ausreißer dar. Der Preis steigt

hier bis auf 200 Euro (in Preisen von 2010) im Jahr 2050. Grund hierfür ist die Annahme eines deutlich ambitionierteren Klimaschutzpfades des EU-ETS. Im Vergleich dazu steigt der Preis im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario der Studie, das von den politischen Rahmenbedingungen des Jahres 2012 ausgeht, auf lediglich 50 Euro je Tonne CO_2. Laut Autorinnen und Autoren führen die Preisunterschiede zu unterschiedlichen Einsatzzeiten der Anlagen zur Stromerzeugung im Verlauf der Szenarien. Mit der zunehmenden Durchdringung der erneuerbaren Energien sinkt der Einfluss des CO_2-Preises jedoch und hat 2050 kaum noch Relevanz (ebd., S. 280). Darüber hinaus bewirkt der hohe Preis die Wirtschaftlichkeit der teuren CCS-Technologie.

Abbildung 2: CO_2-Preis in Euro je Tonne



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

Potential erneuerbarer Energien

Das Potential erneuerbarer Energien wird in den meisten Studien exogen bestimmt und basiert häufig auf externer Literatur. Zu unterscheiden ist zwischen theoretischem, technischem, ökonomischem und ökologischem Potential. Das theoretische Potential der Biomasse ist beispielsweise größer als das ökologische und wird daher häufig aus Gründen der Nachhaltigkeit begrenzt. Ähnliches gilt für Wasserkraft, die einen tiefen Eingriff in das Ökosystem darstellen kann. Das theoretische Potential der Solarenergie ist häufig beinahe unbegrenzt. Die für Solaranlagen tatsächlich verfügbare Fläche ist jedoch aus verschiedenen Gründen beschränkt. In einigen Fällen werden die verwendeten Quellen detailliert betrachtet und vertieft. Zusätzliche Vertiefungspapiere und Begleitberichte existieren u. a. für Australian Energy Market Operator (2013) und Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015).

Berücksichtigt werden in den meisten Fällen nur Technologien, die bereits heute wirtschaftlich betrieben werden können. Das gilt nicht nur für Technologien der erneuerbare Energien: Auch die die Ab-

scheidung und Speicherung von CO_2 (engl. carbon capture and storage, CCS) ist stets ein Diskussionspunkt, weil deren zukünftige Wirtschaftlichkeit noch unklar ist. Die Mehrzahl der Studien vernachlässigt CCS und vermeidet den zusätzlichen Unsicherheitsfaktor.

Die für das technische, theoretische und ökonomische Potential wichtigsten Annahmen betreffen zukünftige Investitionskosten, Lernkurven und Ausbaupotentiale der Technologien. Diese Werte sind vor allem in Modellen mit Kostenoptimierung ausschlaggebend. In zwei Studien (DLR et al. 2012a; SRU 2011) stammen die Berechnungen direkt aus dem verwendeten Modell ReMix, in dem die Potentiale der erneuerbaren Energieressourcen (Solar, Wind, Biomasse, Wasserkraft, Geothermie) in hoher zeitlicher (stündlich) und räumlicher (10x10 km^2) Auflösung auf Datenbasis eines geografischen Informationssystems (GIS) hinterlegt sind. Auch das Modell PowerACE greift auf eine Datenbasis mit Investitionskosten, Lernkurven und Leistungspotentialen zu.

Insgesamt ist festzuhalten, dass die Annahmen zu den Potentialen erneuerbarer Energien mit großen Unsicherheiten einhergehen, das theoretische Potential aber kein limitierender Faktor bei der Erreichung der Klimaziele ist. Vor allem das ökonomische Potential, also der potentielle Kostenvorteil erneuerbarer gegenüber fossiler Energie, ist in Modellen mit Kostenoptimierung ausschlaggebend. Vor diesem Hintergrund ist es verwunderlich, dass der Abbau umweltschädlicher Subventionen – insbesondere für konventionelle Kraftwerke und den Verbrauch fossiler Energie – nur in wenigen Fällen thematisiert wird.

Energieeffizienz

Auf Verbraucherseite werden in einigen Szenarien teils extreme Annahmen zur Steigerung der Energieeffizienz getroffen, die oft auch von den Autorinnen und Autoren selbst als sehr ambitioniert betrachtet werden. Beispiele hierfür sind unter anderem eine sehr schnelle und effiziente Elektrifizierung des Verkehrs, die entsprechend rasche technologische Fortschritte voraussetzt, oder auch eine substantielle Verkehrsverlagerung, die nur mit massiven und frühzeitigen Infrastrukturprojekten zu bewerkstelligen ist. Diese Annahmen sind zum Teil notwendig, um den Energieverbrauch ausreichend für die Zielerreichung zu reduzieren, werden aber in der Regel nicht explizit quantifiziert. Stattdessen wird häufig von jährlich konstanten Effizienzsteigerungsraten oder langfristigen Effizienzzielen ausgegangen, die mit Handlungsmöglichkeiten in verschiedenen Bereichen qualitativ untermauert werden. Für den Wärmesektor werden in diesem Zusammenhang besonders häufig eine gesteigerte Gebäudesanierung, der Ausbau von Fernwärmenetzen und der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) genannt. Im Verkehrsbereich liegen große Potentiale in der Verlagerung und Vermeidung von Verkehr sowie dessen Elektrifizierung. In der Industrie kann vor allem eine verbesserte Abwärmenutzung den Energieverbrauch reduzieren. Sektorübergreifend werden u. a. die Sektorenkopplung, intelligente Stromnetze (smart grids), eine verbesserte Stadtplanung, steuerliche und preisliche Anreize sowie politische Maßnahmen allgemein angeführt.

Einsatz von Flexibilitätsoptionen

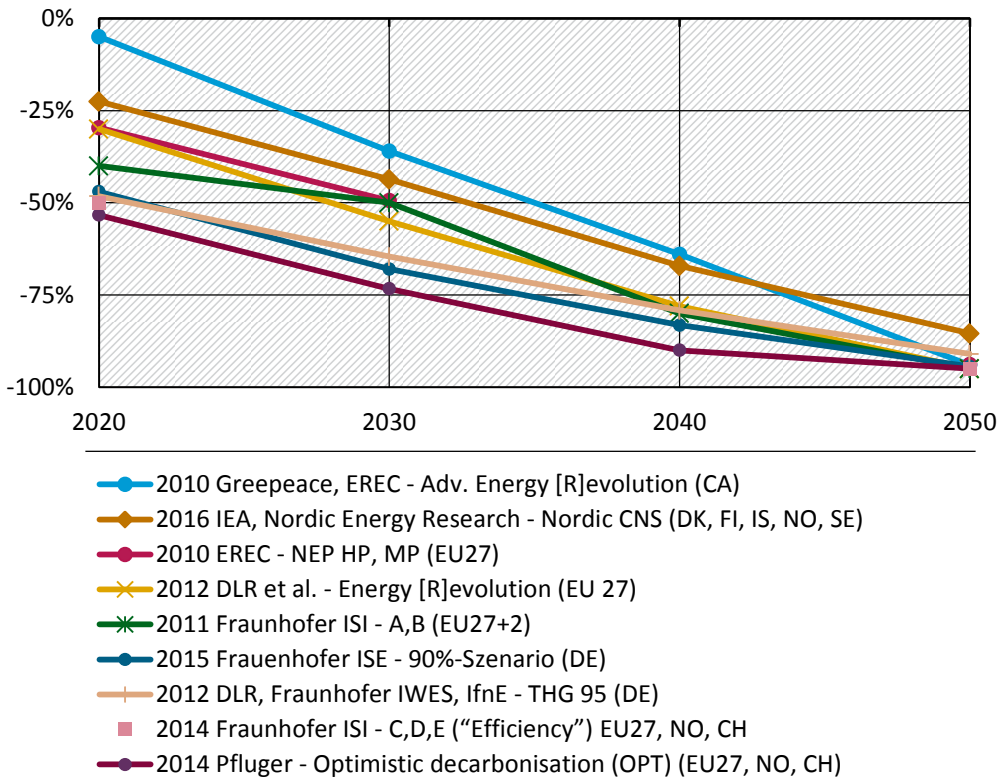
Aufgrund des vermehrten Einsatzes von fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen (insbesondere Wind und Sonne) werden in vielen Studien zusätzliche Annahmen zum Einsatz von Flexibilitätsoptionen getroffen. Unterschiedlichste Speichertechnologien kommen dabei zum Einsatz: z. B. Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Wärmespeicher und Batteriespeicher. Eine detaillierte Analyse von Speichertechnologien findet sich in der Studie von Australian Energy Market Operator (2013). Auch die Umwandlung und langfristige Speicherung von Elektrizität in Form von Methan oder Wasserstoff als Heiz- oder Kraftstoff verschafft mehr Flexibilität bei der Nutzung erneuerbarer Energien und ermöglicht die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Gleiches gilt für die Aufnahme von überschüssigem Strom in batterieelektrischen Fahrzeugen. Einige Studien berücksichtigen die Möglichkeit des Im- und Exports von erneuerbaren Energien – meist in Form von Strom, z. B. mit Nachbarstaaten (UBA

2014), innerhalb der EU (Federal Planning Bureau et al. 2013) oder auch darüber hinaus (siehe z. B. Dii/Fraunhofer ISI 2012; DLR et al. 2012a; IEA/Nordic Energy Research 2016; SRU 2011). Viele Studien betrachten hingegen nationale, autarke Szenarien, die das Potential des Stromhandels, (EE-) Stromüberschüsse und -defizite auszugleichen, vernachlässigen. Weitere erwähnte Flexibilitätsoptionen sind die Back-Up Stromerzeugung z. B. mit Erd- oder Biogas, ein verbessertes Lastmanagement, intelligente Stromnetze oder ein schneller und umfassender Netzausbau (national sowie grenzüberschreitend). Die Annahmen sind nur in wenigen Fällen quantifiziert.

2.2 Entwicklung der CO_2- und Treibhausgasemissionen

Abbildung 3 zeigt die prozentuale Minderung der CO_2-Emissionen gegenüber dem Niveau von 1990 für verschiedene Länder und Regionen. Da die Zielerreichung (entweder 90 % EE-Anteil oder 90 % Emissionsminderung bis 2050) ein Kriterium für die Auswahl der betrachteten Szenarien war, erreichen alle hier abgebildeten Szenarien eine erhebliche Minderung der CO_2-Emissionen von 85 % bis 95 %. Zum Vergleich: das Energiekonzept der Bundesregierung (2010) verfolgt das Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 % zu reduzieren.

Abbildung 3: Minderung der CO_2-Emissionen ggü. 1990



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

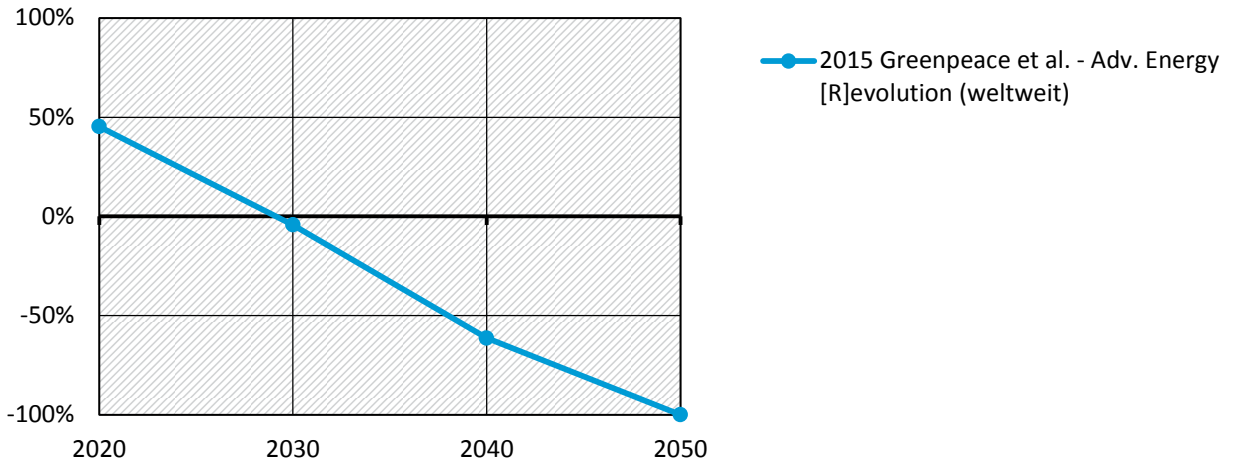
Diese Zielwerte haben für sich genommen also noch keine besondere Aussagekraft. Relevante Unterschiede bestehen aber im zeitlichen Verlauf sowie in der Art, wie das Ziel erreicht wird. Entscheidend sind u. a. Energieverbrauch, Energieerzeugung, technologische Entwicklungen oder auch der Beitrag einzelner Sektoren, die im weiteren Verlauf genauer betrachtet werden.

Zu berücksichtigen ist, dass die verschiedenen Studien in ihren Analysen häufig unterschiedliche Emissionsquellen betrachten. In der Mehrzahl der Studien werden alle energiebedingten CO_2-Emissionen betrachtet. Einige Studien (z. B. ECF et al. 2011; Pfluger 2014) betrachten jedoch ausschließlich Emissionen des Stromsektors. Alle Treibhausgase, wie sie unter dem Kyoto-Protokoll reglementiert sind, werden z. B. in Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) berücksichtigt.

Abbildung 4 zeigt die Veränderung der globalen, energiebedingten CO_2-Emissionen ggü. 1990 aus dem „advanced energy [r]evolution“ Szenario von Greenpeace et al. (2015). Der Anstieg der energiebedingten Emissionen bis zum Jahr 2020 um 45 % gegenüber 1990 ist vor allem auf die Zeit bis 2012 (IST-Jahr der Studie) zurückzuführen. Im Zeitraum 2012-2020 sinken die globalen energiebedingten Emissionen minimal von 30.469 auf 30.416 Mio. t CO_2. Im Jahr 2050 wird die vollständige Dekarbonisierung erreicht. Voraussetzung dafür sind eine weitreichende, weltweite Elektrifizierung aller Sektoren, ein massiver Ausbau erneuerbarer Energien und erhebliche Effizienzsteigerungen in allen Bereichen.

Nicht berücksichtigt werden nicht-energiebedingte Emissionen z. B. von Industrieprozessen und -produkten, der Abfallwirtschaft, der Land- und Forstwirtschaft oder durch Landnutzungsänderungen (LULUCF).

Abbildung 4: Veränderung der CO_2-Emissionen ggü. 1990, weltweit



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studie

Auch städtische und regional begrenzte Szenarien (vgl. Textbox in Kapitel 1.2) erreichen teils sehr ambitionierte Reduktionen. In einem Szenario für Hannover (Landeshauptstadt und Region Hannover 2013) werden bis 2050 die Treibhausgasemissionen der gesamten Region im Vergleich zu 1990 um 95 % reduziert. Auch Seattle und Berlin könnten bis 2050 ihre Emissionen signifikant um 90 % (ggü. 2008) bzw. 85 % (ggü. 1990) senken (Lazarus et al. 2011; PIK et al. 2014). Lediglich die betrachteten Politikszenarien für das Bundesland Bayern leiten aus dem Energiekonzept der Bundesregierung deutlich schwächere Ziele ab. Die CO_2-Emissionen werden in den Szenarien bis 2050 um lediglich 34,7 bis 49,3 % ggü. 1990 gemindert (Leipziger Institut für Energie 2012).

2.2.1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Sektoren

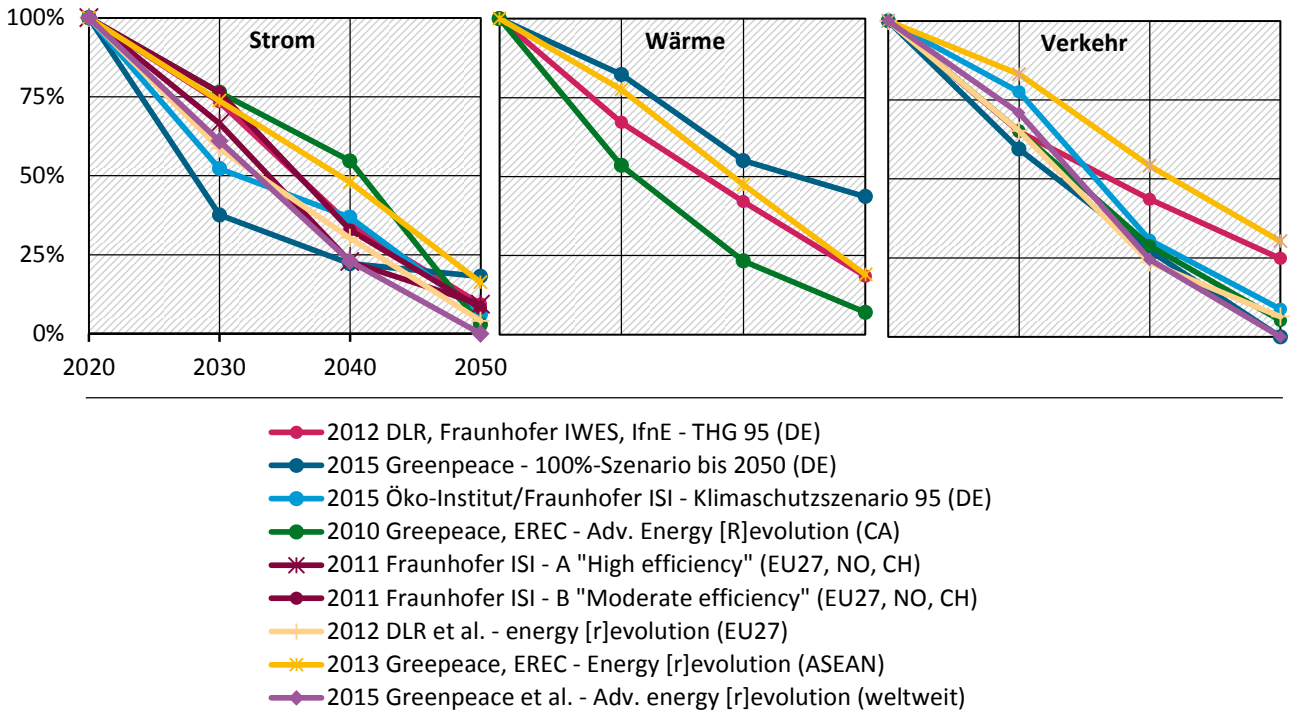
Die Minderung der CO_2-Emissionen ist in Abbildung 5 in die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr unterteilt dargestellt. Zugunsten der Vergleichbarkeit sind die Werte in Relation zum Jahr 2020 dargestellt. Nicht zu erkennen ist daher der Fortschritt der Dekarbonisierung bis 2020.

Stromsektor

Der Stromsektor wird in allen abgebildeten Szenarien fast vollständig dekarbonisiert. Verbleibende CO_2-Emissionen stammen häufig von Gaskraftwerken, die in einigen Szenarien (z. B. Fraunhofer ISI 2011; Greenpeace 2015) als flexibler Stromproduzent zum Einsatz kommen. Greenpeace (2015) weist darauf hin, dass der Einsatz der Gaskraftwerke in ihrem Szenario z. B. durch den Einsatz von zusätzlichen Speichern oder die künstliche Erzeugung von Synthesegas mit EE-Strom vermieden werden könnte. Auch in Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) verbleibt ein Rest an CO_2-Emissionen des

Stromsektors, der durch Erdgas und die Müllverstromung verursacht wird. In den zusätzlich betrachteten städtischen und regional begrenzten Szenarien (vgl. Textbox in Kapitel 1.2) kann der Stromsektor in zwei von vier Fällen vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Seattle z. B. bezieht bereits heute fast ausschließlich emissionsfreien[2] Strom aus Wasserkraft (Lazarus et al. 2011). Die Region Hannover kann im Jahr 2050 rund 90 % des Stroms mit Wind- und Solarenergie erzeugen und den Rest weitestgehend mit Biogaserzeugung decken (Landeshauptstadt und Region Hannover 2013). Berlin und Bayern hingegen müssen auch 2050 noch Strom zu großen Teilen aus fossilen Energieträgern (in erster Linie Erdgas) erzeugen (Leipziger Institut für Energie 2012; PIK et al. 2014).

Abbildung 5: Minderung der CO_2-Emissionen in den Sektoren Strom, Wärme, Verkehr (2020=100%)



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

Wärmesektor

Die Dekarbonisierung des Wärmesektors gestaltet sich generell schwieriger als die des Stromsektors. DLR et al. (2012b, S. 149) sehen dafür technische, ökonomische und strukturelle Gründe sowie ein begrenztes Potential des Einsatzes von Biomasse. Der Anteil erneuerbarer Energien (EE-Anteil) im Wärmesektor beträgt im Szenario „THG 95“ für Deutschland daher nur 70 % im Jahr 2050, während er im Bereich Strom bei 94 % liegt. Die verbleibenden CO_2-Emissionen belaufen sich 2050 auf rund 40 Mio. Tonnen. Im 100-Prozent-Szenario von Greenpeace (2015) beträgt der EE-Anteil im Wärmesektor 2050 ebenfalls rund drei Viertel; die Emissionen werden auf 69 Mio. t CO_2äq reduziert. Die deutlich ambitioniertere Minderung im „advanced energy [r]evolution“ Szenario für Kanada (Greenpeace/EREC 2010, S. 70) ist auf einen deutlich höheren EE-Anteil (92 %) zurückzuführen, der durch einen verstärkten Einsatz der Geothermie ermöglicht wird. Auch im „Ziel-Pfad“ der Region Hannover (Landeshauptstadt und Region Hannover 2013) kann der Wärmebedarf zunächst nicht zu 100 % aus

[2] Es wurde nicht überprüft, inwiefern darin auch Strom aus Pumpspeicherkraftwerken mit unklarem Ursprung enthalten sein kann.

erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. Es werden jedoch Optionen diskutiert, wie der verbleibende Bedarf nachhaltig gedeckt werden könnte. Denkbar sind laut den Autorinnen und Autoren die Nutzung von überschüssigem EE-Strom zur Herstellung von erneuerbarem Gas zum Einsatz im Bereich der Fernwärme, eine intensivere Nutzung von Abwärme aus Industrie, GHD und Abwasser, die Nutzung von Tiefen-Geothermie sowie der Import von erneuerbarem Gas und EE-Strom aus anderen Regionen Deutschlands.

Neben den in Abbildung 5 dargestellten Studien setzen sich weitere Studien mit der Dekarbonisierung des Wärmesektors auseinander, ohne jedoch quantitative, hier darstellbare Werte zu liefern. Diese Studien zeichnen in einigen Fällen ein optimistischeres Bild. Eine vollständig treibhausgasneutrale Wärmeversorgung mit regenerativen Energien wird beispielsweise in einer Studie des UBA (2014) beschrieben.

Verkehrssektor

Die Möglichkeiten der Dekarbonisierung des Verkehrssektors fallen in den dargestellten Szenarien sehr unterschiedlich aus. Greenpeace (2015) und Greenpeace et al. (2015) erreichen eine vollständige Dekarbonisierung in Deutschland und weltweit. Tiefgreifende Veränderungen des Sektors werden dabei vorausgesetzt. Dazu gehören u. a. die konsequente Vermeidung und Verlagerung von Verkehr sowie technologische Fortschritte. Die Studie für Deutschland (Greenpeace 2015) geht davon aus, dass im Jahr 2050 der mobilisierte Individualverkehr zu 100 % mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben wird. Der öffentliche Personenverkehr wird weitestgehend mit Biogas und „Windgas“ (Synthesegas aus Wind-Strom), der Güterverkehr mit EE-Strom und Biokraftstoffen betrieben. Der Binnenluft- und Binnenschiffverkehr sowie internationaler Verkehr werden dabei jedoch nicht quantifiziert. In der weltweiten Studie von Greenpeace et al. (2015) werden der Luft- und Schiffverkehr vor allem mit Biokraftstoffen und synthetischen Kraftstoffen oder Wasserstoff versorgt. Die vollständige Dekarbonisierung ist im Gegensatz zum Wärmesektor also technisch denkbar. Der verbreitete Einsatz von Biokraftstoffen und synthetischen Kraftstoffen ist aber aus ökologischen und ökonomischen Gründen fraglich. Insbesondere der hohe Strombedarf für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe stellt den Stromsektor in vielen Szenarien vor zusätzliche Herausforderungen (siehe Kapitel 2.4.1).

Auch in DLR et al. (2012a) ist ein fundamentaler Strukturwandel im Verkehrsbereich mit neuen Antriebstechnologien und einer veränderten Versorgungsinfrastruktur notwendig. Ein Durchbruch der Elektromobilität führt dabei zur sichtbaren Minderung des Energieverbrauchs insgesamt (vgl. Kapitel 2.3.1) bei steigendem Strombedarf (vgl. Kapitel 2.4.1). Weitreichende politische Maßnahmen (insbesondere CO_2-Grenzwerte, Kraftstoffpreise) sind für die Realisierung der erforderlichen Entwicklung des Verkehrsbereichs notwendig. Die Autorinnen und Autoren bemängeln das Fehlen eines integrierten, langfristigen Mobilitätskonzepts für Deutschland und Europa.

2.2.2 Zentrale Einflussgrößen

Die wichtigsten Determinanten des Treibhausgasausstoßes in den Szenarien sind die Entwicklung des Energiebedarfs sowie der Einsatz von erneuerbaren Energien. Ein deutlicher Rückgang des Energieverbrauchs ist Voraussetzung für ein Erreichen der Szenarioziele in den meisten Ländern und Regionen der Welt. Die Entwicklung des Energiebedarfs in den Szenarien wird in Kapitel 2.3.1 beschrieben. In der Entwicklung spiegeln sich natürlich auch die in Kapitel 2.1 beschriebenen Annahmen u. a. zur Energieeffizienz wider.
Die Entwicklung der erneuerbaren Energien wird in Kapitel 2.3.2 beleuchtet. Um den Einsatz der EE in allen Bereichen zu ermöglichen, ist vor allem die weitgehende Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Verkehr notwendig, wodurch der Bedarf an EE-Strom deutlich steigt. Der Stromsektor wird damit zum zentralen Faktor für die Dekarbonisierung (siehe Kapitel 2.4.1), und ein deutlicher Zuwachs der installierten EE-Kapazitäten wird notwendig (siehe Kapitel 2.4.2).

2.3 Entwicklung des Energiebedarfs und Anteils erneuerbarer Energien

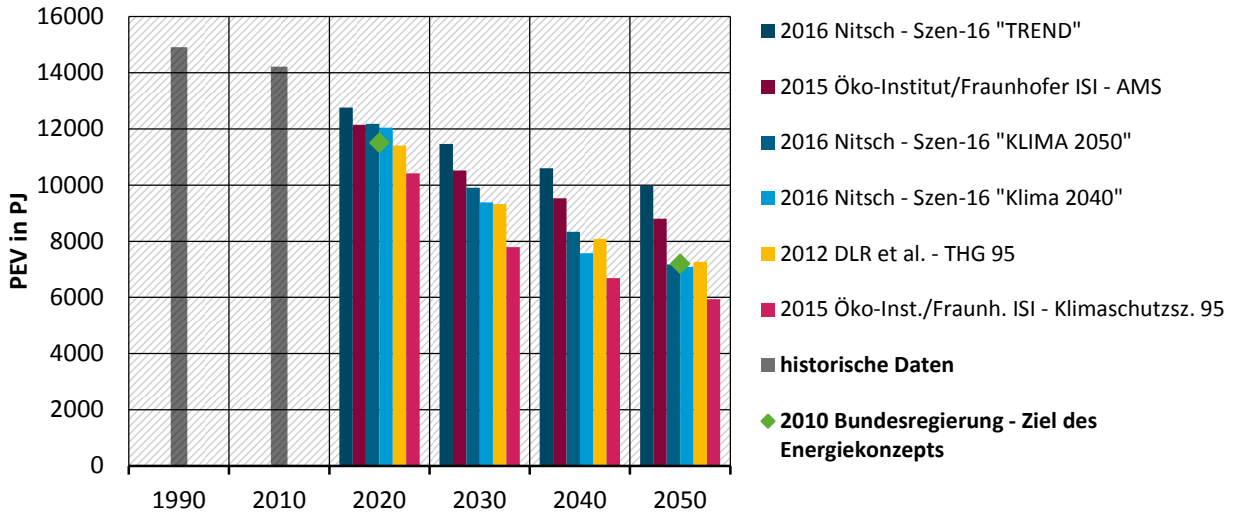
2.3.1 Primär- und Endenergieverbrauch

Die Verringerung des Energieverbrauchs ist in fast allen betrachteten Studien eine Voraussetzung für die Erreichung der gesteckten Klimaziele. Das gilt sowohl für Deutschland (vgl. Abbildung 6) als auch international (siehe z. B. DLR et al. 2012b; Greenpeace et al. 2015). Ausgenommen sind in einigen Studien die meisten Entwicklungs- und Schwellenländer Asiens und Afrikas (siehe z. B. (Greenpeace et al. 2015; Greenpeace/EREC 2013), für die von einer Zunahme des Energiebedarfs bis 2050 ausgegangen wird.

Primärenergieverbrauch

Für Deutschland hat die Bundesregierung das Ziel ausgegeben, den Primärenergieverbrauch ggü. 2008 um 20 % bis 2020 bzw. um 50 % bis 2050 zu reduzieren (Bundesregierung 2010). Das entspricht einer Reduktion auf rund 11.500 PJ im Jahr 2020 bzw. 7.190 PJ 2050 (vgl. Abbildung 6). In den Referenzszenarien „Trend“ und „AMS“ (Nitsch 2016; Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015) werden diese Ziele sowie die Klimaschutzziele nicht erreicht. Für die Zielszenarien „Klima 2050“, „Klima 2040“, „THG 95“ und „Klimaschutzszenario 95“ hingegen ist die erfolgreiche langfristige Reduktion des Energieverbrauchs bis 2050 Voraussetzung für die Erreichung der Klimaziele. Die Szenarien „Klima 2050“ und „Klima 2040“ gehen dabei schon nicht mehr von der Erfüllung der 2020-Ziele aus.

Abbildung 6: Primärenergieverbrauch (PEV) in PJ, Deutschland



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

Für die notwendige Reduktion des Verbrauchs werden in fast allen Studien erhebliche Steigerungen der Energieproduktivität sowie ein effizienterer Umgang mit Energie vorausgesetzt. Häufig werden dazu vereinfachend konstante jährliche Effizienzsteigerungsraten angenommen (siehe Kapitel 2.1). Große Potentiale werden im Umwandlungssektor der Energiebereitstellung gesehen. Laut DLR et al. (2012a) gehen rund 29 % der Primärenergie bei der Umwandlung verloren, vor allem durch Abwärmeverluste bei der Stromerzeugung. Wichtiger Baustein ist daher fast immer die Kraft-Wärme-Kopplung.

Auch der Endenergieverbrauch muss gemäß den Studien erheblich reduziert werden. Besonders wichtig sind in diesem Zusammenhang der Verkehrs- und Gebäudesektor bzw. der Wärmesektor (siehe Kapitel 2.3.3). In DLR et al. (2012a) werden für den Gebäudebereich Sanierungsraten vorausgesetzt, die

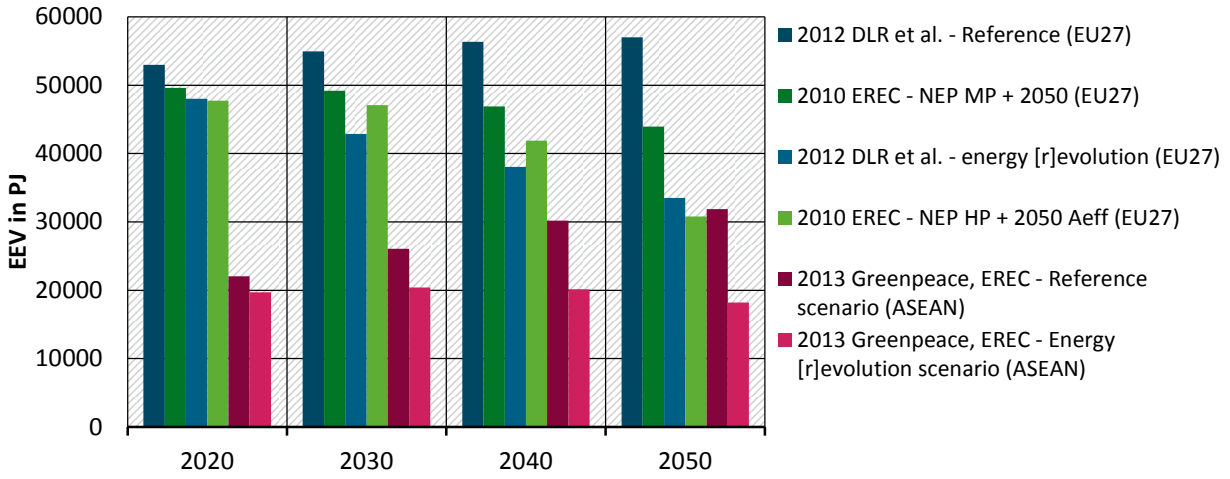
laut den Autorinnen und Autoren in Anbetracht der aktuellen Situation als sehr ambitioniert anzusehen sind. Im Verkehrssektor wird der Einfluss unterschiedlicher Strategien deutlich. Eine Elektrifizierung des Verkehrs führt im Vergleich zu einer Strategie mit mehr Wasserstoff zu deutlich geringerem Primärenergieverbrauch (DLR et al. 2012a). Grund hierfür sind die hohen Umwandlungsverluste der Wasserstoffbereitstellung.

Die Szenarien von Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) erreichen – unter anderem aufgrund der hohen angenommenen Effizienzsteigerungen – einen besonders deutlichen Rückgang des Primärenergieverbrauchs. Zu beachten ist dabei, dass der nicht-energetische Verbrauch in dieser Studie nicht berücksichtigt wird. Dieser machte in der Vergangenheit rund 7 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland aus (DLR et al. 2012a).

Endenergieverbrauch

Die Aussagen zum Primärenergieverbrauch in Deutschland gelten im Wesentlichen auch für den Endenergieverbrauch weltweit. Die Verringerung des Energieverbrauchs ist eine notwendige Voraussetzung für die Erreichung der Klimaziele. Auch in den internationalen Studien (vgl. Abbildung 7) stehen dabei insbesondere die Sektoren Wärme und Verkehr im Fokus.

Abbildung 7: Endenergieverbrauch (EEV) in PJ, EU27 und ASEAN



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

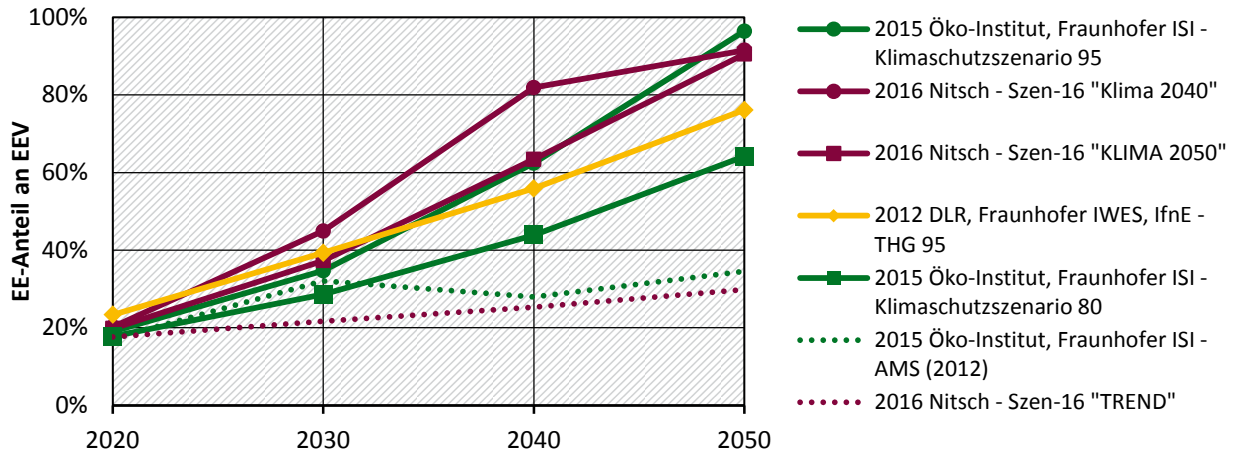
In den hier abgebildeten Studien finden sich substantielle Annahmen zu Effizienzsteigerungen – häufig ohne detaillierte Beschreibung oder Quantifizierung der Maßnahmen. In Greenpeace/EREC (2013) beispielsweise wird von fortwährender Innovation und dem Einsatz modernster Technologie ausgegangen. In EREC (2010) werden weitreichende Effizienzpotentiale unter anderem mithilfe von Politikmaßnahmen gehoben. Im Szenario „NEP HP + 2050 AEff“ („aggressive efficiency“) wird eine zusätzliche Steigerung der Effizienz von 30 % ggü. dem Szenario „NEP MP + 2050“ angenommen. Wie in DLR et al. (2012b) sollen solche Potentiale vor allem im Wärmebereich (u. a. Passivhäuser) und im Verkehr (u. a. Elektrifizierung) erschlossen werden.

2.3.2 EE-Anteil am Endenergieverbrauch

Zusätzlich zur Reduzierung des Energieverbrauchs insgesamt muss der verbleibende Bedarf zunehmend durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Der EE-Anteil am Endenergieverbrauch für deutsche Szenarien ist in Abbildung 8 dargestellt. Die gestrichelten Linien geben die Werte der Referenzszenarien aus Nitsch (2016) und Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) wieder. Sie zeigen den Trend

bzw. eine mögliche Entwicklung des EE-Anteils in Deutschland unter unveränderten Rahmenbedingungen und erreichen im Jahr 2050 weniger als 35 %. Die Zielszenarien derselben Studien erreichen hingegen EE-Anteile zwischen 64 und 96 %. Oft ist der hohe Anteil das vordefinierte Ziel des Szenarios. Entscheidend ist daher, wie diese Ziele erreicht werden. Ein Faktor ist dabei die zuvor erwähnte Reduzierung des Energieverbrauchs, ein anderer der Ausbau und Einsatz der erneuerbaren Energien.

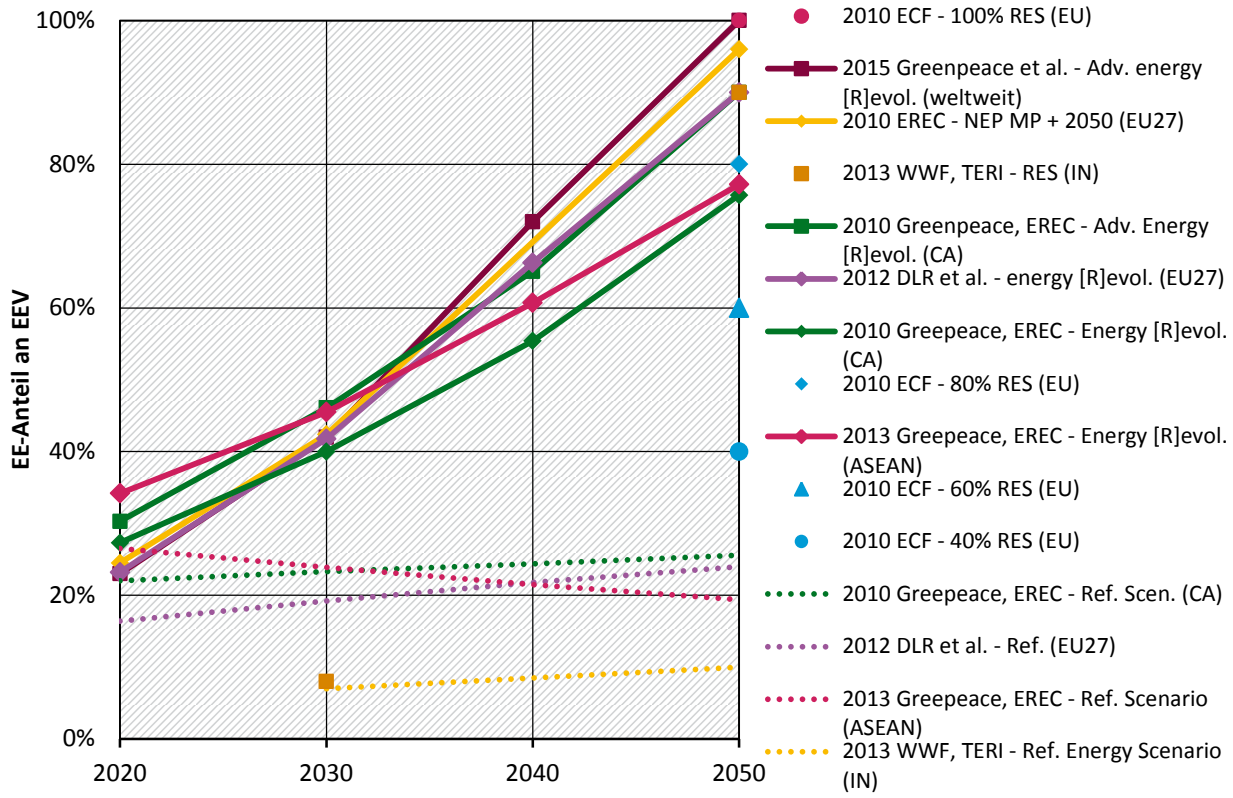
Abbildung 8: Anteil EE am Endenergieverbrauch (EEV), Deutschland



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

International betrachtet ergibt sich ein ähnliches Bild, vgl. Abbildung 9. In den Referenzszenarien (gestrichelt) werden kaum Fortschritte erzielt. In Greenpeace/EREC (2013) ist der EE-Anteil für den Verband Südostasiatischer Nationen (ASEAN) sogar rückläufig. Die hohen EE-Anteile der internationalen Zielszenarien sind wie in den deutschen häufig ein vordefiniertes Ziel und nicht Ergebnis der Berechnungen.

Abbildung 9: Anteil EE am Endenergieverbrauch (EEV), international



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

Betrachtung der Sektoren

Die hohen EE-Anteile der Zielszenarien setzen erhebliche Investitionen und Kapazitätsausweitungen der EE-Technologien voraus. Die zunehmende Sektorenkopplung durch Elektrifizierung der Sektoren Verkehr und Wärme bringen den Stromsektor dabei in eine zentrale Position. Rund die Hälfte des weltweiten Endenergieverbrauchs entfallen im „advanced energy [r]evolution"- Szenario von Greenpeace (2015) im Jahr 2050 auf Strom, der fast vollständig mit erneuerbaren Energien erzeugt wird. Im Jahr 2012 waren es laut den Autorinnen und Autoren rund 21 % des Endenergieverbrauchs bei einem EE-Anteil von 21 %. Der direkte Verbrauch an EE-Strom verzehnfacht sich im Zeitraum 2011 bis 2050. Die Entwicklung des Stromverbrauchs und der Bereitstellung von EE-Strom wird in Kapitel 2.4 genauer betrachtet.

Viele Bereiche des Verkehrssektors können langfristig fast vollständig elektrifiziert werden, so dass der Stromverbrauch in den meisten Szenarien langfristig den Großteil des Endenergieverbrauchs ausmacht. Im Luft- und Schiffverkehr werden zusätzlich Biokraftstoffe und synthetische Kraftstoffe verwendet, von denen letztere ebenfalls zum Stromverbrauch beitragen. Mit der Brennstoffzellentechnologie steigt in einigen Szenarien auch der Verbrauch an Wasserstoff deutlich an, der wiederum mittels EE-Stroms gewonnen wird.

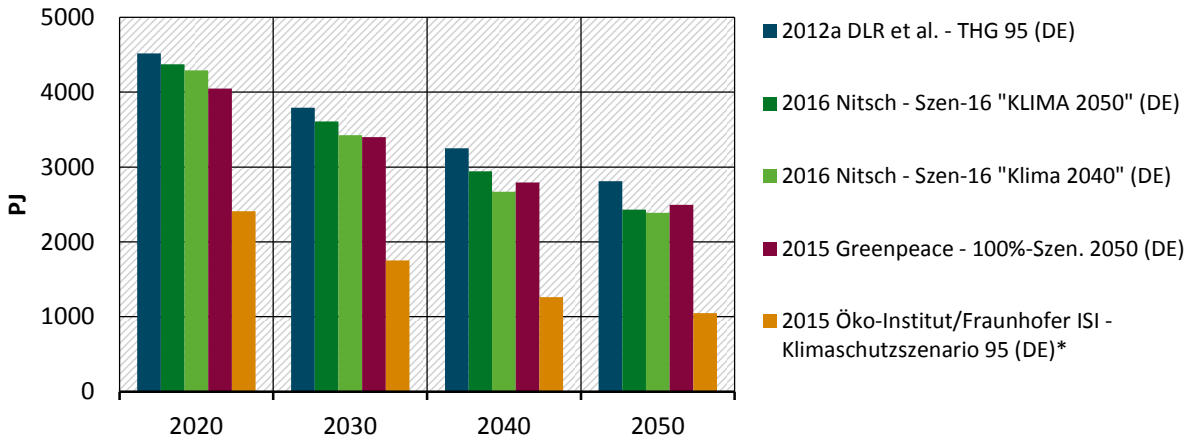
Im Wärmesektor nimmt die Nutzung von Strom in den meisten Szenarien ebenfalls zu, ist aber vergleichsweise geringer. Der Großteil des Endenergiebedarfs wird meist durch Solar- und Geothermie sowie Biomasse gedeckt. Häufig kommen fossile Energieträger auch 2050 noch zum Einsatz. Wichtig ist dabei die Verdrängung von Kohle und Öl durch vergleichsweise weniger klimaschädliches Erdgas. Der Wärmesektor wird im folgenden Kapitel 2.3.3 genauer betrachtet.

2.3.3 Energieverbrauch und EE im Wärmesektor

Der Wärmebedarf (insb. für Raumheizung, Warmwasser und Prozesswärme) verantwortet in etwa die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland. Die in Abbildung 10 widergegebenen Szenarien gehen von einem Verbrauch in Höhe von 4.000 bis 4.500 PJ im Jahr 2020 aus. 2012 lag der tatsächliche Verbrauch noch bei fast 5.000 PJ. Die Werte von Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) geben lediglich den Verbrauch von Haushalten und GHD an. Die Differenz ist vor allem auf das Fehlen des Industrieverbrauchs zurückzuführen. In allen Szenarien verringert sich der Wärmebedarf stetig auf rund 2.400 bis 2.800 PJ im Jahr 2050, der Bedarf von Haushalten und GHD im „Klimaschutzszenario 95“ auf 1.047 PJ.

Zur Erreichung der ambitionierten Reduktionsziele ist laut Nitsch (2016) ein völliger Umbau des Wärmesektors nötig. Insbesondere im Bereich der Raumwärme werden dabei die größten Reduktionspotentiale gesehen (siehe z. B. DLR et al. 2012a). Aktuell ist eine dezentrale Einzelversorgung z. B. mit Öl- und Gasheizung üblich. Zukünftig muss die Wärmeversorgung deutlich effizienter ausgestaltet sein. Als zielführend gilt dabei vor allem die Versorgung über das Wärmenetz mit steigendem Anteil an Fernwärme aus KWK-Anlagen, die unter anderem mit EE-Wasserstoff oder biogenen Brennstoffen betrieben werden, oder auch die Nahwärmeversorgung mit Solar- und Geothermie (DLR et al. 2012a; Nitsch 2016). Auch das Heizen mit elektrischen Wärmepumpen oder elektrischen Heizungen kann bei Verwendung regenerativ erzeugten Stroms gemäß DLR et al. (2012a) an Bedeutung gewinnen. Im Szenario THG 95 werden 25 % der Raumwärme mit Biomasse erzeugt, 22 % sind Umwelt- und Erdwärme, 21 % sind fossile Fern- und Nahwärme und jeweils 14 % werden mit Solarthermie und Elektrizität erzeugt.

Abbildung 10: Endenergieverbrauch Wärme in PJ, Deutschland



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien
*nur Haushalte und GHD

Die Reduktionspotentiale in den Bereichen Warmwasser und Prozesswärme werden im Vergleich zur Raumwärme deutlich geringer eingeschätzt.

Neben der effizienteren Bereitstellung muss auch der Wärmebedarf reduziert werden. In DLR et al. (2012a) wird dazu von einem Anstieg der Sanierungsrate auf 2 % ausgegangen, wie im Energiekonzept der Bundesregierung vorgesehen. Gleichzeitig verdreifacht sich die Wirksamkeit der Sanierungen (höhere Sanierungstiefe). Greenpeace (2015) – wie auch die meisten anderen Studien – stufen die Wahrscheinlichkeit der Fortschritte gemäß dem eigenen Szenario im Wärmesektor als gering ein.

Ergänzend zur Reduktion des Endenergieverbrauchs muss der Wärmesektor zunehmend mit erneuerbaren Energien versorgt werden. Im Jahr 2015 betrug hier der EE-Anteil rund 13,5 %. Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2015) halten langfristig starke Preissignale für notwendig, um bis 2050 fossile

Energieträger vollständig zu verdrängen. Insbesondere Erdgas bleibt in den Szenarien lange wettbewerbsfähig. In Nitsch (2016) deckt EE-Strom rund 30 % des Wärmebedarfs im Jahr 2050. Die dazu notwendigen Strukturveränderungen werden aufgrund der „bisherigen Trägheit“ des Sektors als „sehr unwahrscheinlich“ eingestuft (ebd. 2016, S. 8). Der steigende Strombedarf des Wärmesektors durch die Sektorenkopplung stellt eine wachsende Herausforderung für den Stromsektor dar (siehe auch Kapitel 2.4).

Der EE-Anteil bei der Wärmebereistellung betrug in der EU27 rund 14 % im Jahr 2009 (DLR et al. 2012b) und weltweit 21 % im Jahr 2015 (Greenpeace et al. 2015). Biomasse leistet dabei noch den größten Beitrag, wird in den Zielszenarien jedoch zukünftig vor allem von Solar- und Geothermie verdrängt. Das größte strukturelle Hemmnis in der EU stellt laut DLR et al. (2012b) das Fehlen von Fernwärmenetzen dar. Die nötigen EU-weiten Investitionen im Zielszenario belaufen sich im gesamten Sektor auf fast 3.000 Mrd. Euro bis 2050. Die Entwicklung und der Ausbau der Solarthermie sind für mehr als die Hälfte der Investitionskosten verantwortlich.

In der ASEAN Region (Greenpeace/EREC 2013) wird heute bereits fast die Hälfte des Wärmebedarfs mit erneuerbaren Energien gedeckt, größtenteils Biomasse. Der Wert steigt im Zielszenario der Studie auf 78 % in 2050. Dabei reduziert sich der Einsatz von Biomasse im Gegensatz zu heute jedoch deutlich und wird zu großen Teilen durch effizientere Technologien ersetzt, insbesondere Solarthermie.

In allen Studien wurden zur Erreichung der Szenarioziele im Wärmebereich erhebliche Effizienzsteigerungen gegenüber den Referenzszenarien angenommen. Der Einsatz effizienterer Technologie in der Bereitstellung sowie Effizienzsteigerungen beim Verbrauch – z. B. durch Gebäudesanierung – sind notwendig. Es kommt zu einer radikalen Energieträgersubstitution und deutlich höheren EE-Anteilen. Innerhalb der fossilen Energieträger, die in vielen Szenarien auch 2050 noch zum Einsatz kommen, verdrängt Gas die klimaschädlicheren Energieträger Kohle und Öl.

2.4 Entwicklung von Stromverbrauch und -bereitstellung

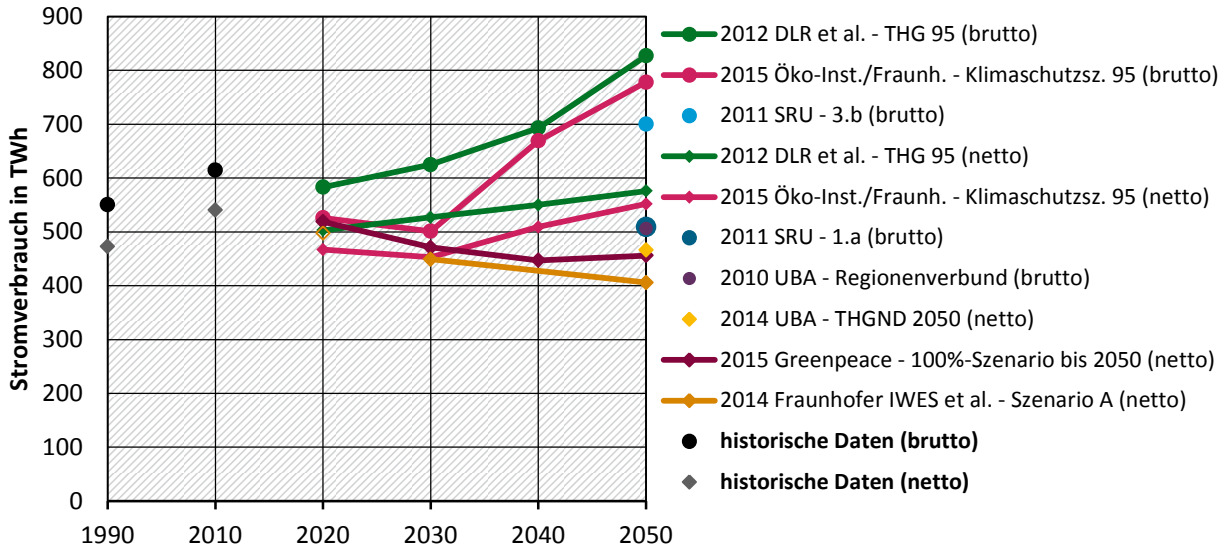
2.4.1 Stromverbrauch

Aufgrund zunehmender Elektrifizierung und Sektorenkopplung gewinnt der Stromsektor für den Klimaschutz mit der Zeit weiter an Bedeutung. Einerseits kann der Stromsektor in vielen Szenarien bis 2050 fast vollständig dekarbonisiert werden (vgl. Kapitel 2.2.1). Andererseits steigen die Anforderungen mit dem zusätzlichen Stromverbrauch aus den Sektoren Verkehr und Wärme, in denen die direkte Nutzung fossiler Kraft- und Brennstoffe zunehmend durch Strom verdrängt wird. So sinkt der Energiebedarf insgesamt in fast allen Zielszenarien (vgl. Kapitel 2.3.1), die Entwicklung des Stromverbrauchs fällt hingegen unterschiedlich aus (vgl. Abbildung 11).

Abbildung 11 zeigt den Stromverbrauch brutto (runde Markierungspunkte) und netto (eckige Markierungspunkte der Szenarien für Deutschland von 2020 bis 2050 sowie die tatsächlichen Verbräuche der Jahre 1990 und 2010. Der Nettostromverbrauch bezeichnet die vom Endverbraucher genutzte elektrische Energie. Gegenüber dem Bruttostromverbrauch fehlen die Eigenverbräuche der Kraftwerke sowie Netzverluste. Die Differenz betrug in den Jahren 2015 und 2016 rund 13 % des Bruttostromverbrauchs (Statistisches Bundesamt 2017). Diese Differenz steigt in einigen Szenarien ab ca. 2030 sehr stark an (z. B. DLR et al. 2012a; Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015). Grund dafür ist in beiden Studien vor allem der Stromverbrauch der Wasserstofferzeugung, z. B. für synthetische Kraftstoffe, die mit erheblichen Umwandlungsverlusten einhergeht.

Die Entwicklung des Verbrauchs ist in den meisten Studien exogen bestimmt.

Abbildung 11: Stromverbrauch in TWh (brutto und netto)[1], Deutschland



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

[1] Runde Markierungspunkte kennzeichnen Bruttostromverbräuche, eckige stehen für Nettostromverbräuche.

Im Szenario „THG 95“ (DLR et al. 2012a) steigt der Bruttostromverbrauch in Deutschland zwischen 2020 und 2050 um 42 % auf fast 830 TWh – bei gleichzeitig fallendem Primär- und Endenergieverbrauch. Alle betrachteten Verbrauchssektoren (Industrie, Kleinverbraucher, Private Haushalte und Verkehr) können ihren Energiebedarf deutlich senken. Gleichzeitig steigt aber der Grad der Elektrifizierung. Insbesondere die Elektromobilität sowie die Herstellung von Wasserstoff und Methan für den Güterverkehr erzeugen im Szenario zusätzlichen Bedarf. Letztere erklären, wie bereits erwähnt, einen Großteil der zunehmenden Differenz zwischen Brutto- und Nettostromverbrauch.

Auch im „Klimaschutzszenario 95“ (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015) steigt der Stromverbrauch (jedoch erst ab 2030) bei sinkendem Primär- und Endenergieverbrauch. Der Stromverbrauch wird dabei endogen bestimmt, er ist also ein Modellierungsergebnis und keine exogene Annahme. Auf der einen Seite werden hohe Energieeinsparungen in den Bereichen Industrie, GHD, Haushalte und Verkehr angenommen. Gleichzeitig verlagert sich der Verbrauch durch die Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Verkehrs in den Stromsektor. Der Anstieg des Bruttostromverbrauchs um 142 TWh zwischen 2030 und 2040 ist dabei größtenteils auf den zusätzlichen Bedarf des Verkehrssektors zurückzuführen. Allein der Verbrauch des Straßenverkehrs steigert sich von 22 auf 73 TWh. Auch die Herstellung von Synthesegas (Power-to-Gas) setzt im Zeitraum 2030 bis 2040 ein und schafft eine zusätzliche Nachfrage von 94 TWh. Diese Trends setzen sich im Szenario bis 2050 fort.

Die Szenarien „1.a.“ und „3.b“ in SRU (2011) gehen von unterschiedlichen Bruttostromverbräuchen im Jahr 2050 aus (509 bzw. 700 TWh). Wie in den meisten Studien ist der Stromverbrauch also exogen vorgegeben. Laut den Autorinnen und Autoren sind 700 TWh wahrscheinlicher, „wenn es in bestimmten Sektoren zu einer stärkeren Nutzung von Strom anstelle fossiler Energieträger kommt (z. B. Straßenverkehr, Heizwärme, industrielle Prozesswärme)“ (ebd., S. 75), wovon in den meisten anderen Studien ebenfalls ausgegangen wird.

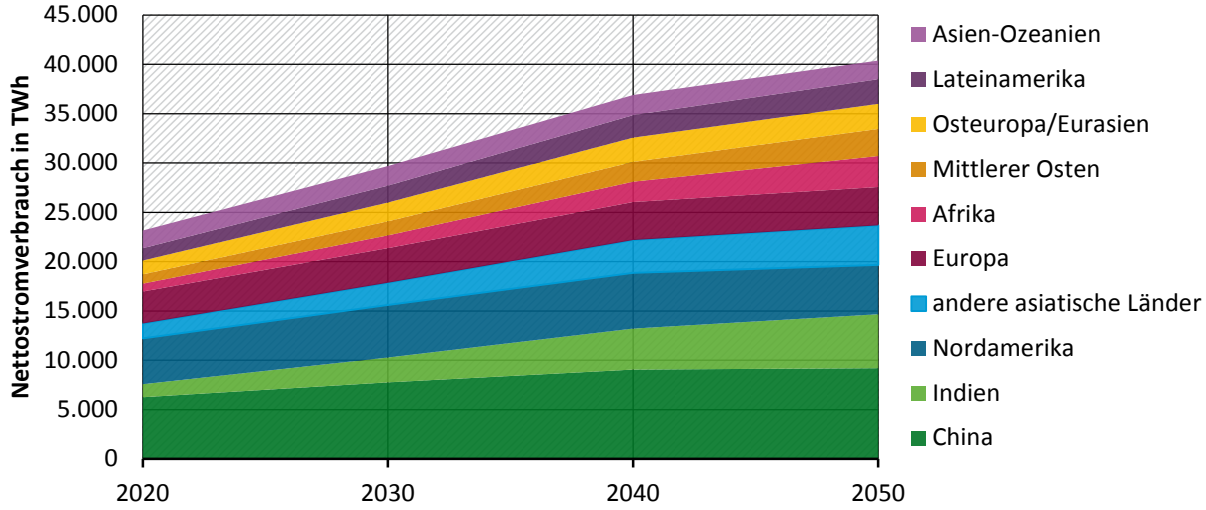
Die Szenarien, welche eine Reduktion des Stromverbrauchs bis 2050 erzielen, betrachten meist den Nettostromverbrauch. Beispielsweise ist die Reduktion des Nettostromverbrauchs in „Szenario A“ (Fraunhofer IWES et al. 2014) eine exogene Annahme und entstammt dem Energiekonzept der Bundesregierung (2010). Die Reduktion in Greenpeace (2015) ist u. a. darauf zurückzuführen, dass der Strombedarf des Verkehrsbereichs weniger stark ansteigt als beispielsweise in Öko-Institut/ Fraunhofer ISI (2015). Auch die Nachfrage in den Bereichen Industrie, GHD und Haushalte ist hier 2050

deutlich niedriger. Auch in UBA (2010) fällt die Stromnachfrage (brutto) aus dem Verkehrssektor deutlich geringer aus, ebenso die der anderen Verbrauchssektoren.

Auf internationaler Ebene sind die Angaben zum Stromverbrauch zwischen den Studien nur schwer miteinander vergleichbar. In manchen Studien fehlt eine eindeutige Definition, während der Stromverbrauch in anderen Studien häufig brutto, netto oder auch netto inklusive Netzverluste angegeben ist. Die Studie von Greenpeace et al. (2015) hat einen weltweiten Fokus und liefert daher vergleichbare Werte des Nettostromverbrauchs für verschiedene Länder und Weltregionen. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse des Szenarios „advanced energy [r]evolution“, angeordnet nach dem Stromverbrauch im Jahr 2050.

Der weltweite Stromverbrauch steigt im Szenario zwischen 2020 und 2050 um 73 % auf über 40.000 TWh. Enorme Zuwächse sind u. a. in Indien (+314 %), Afrika (+293 %) und dem Nahen Osten (+192 %) zu verzeichnen. Größter Verbraucher im Szenario ist und bleibt China. Mit 9.202 TWh ist das Land 2050 für fast ein Viertel des weltweiten Verbrauchs verantwortlich.

Abbildung 12: Nettostromverbrauch in TWh, weltweit im Szenario „advanced energy [r]evolution“



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studie von Greenpeace et al. (2015)

2.4.2 Installierte Leistung erneuerbarer Energien

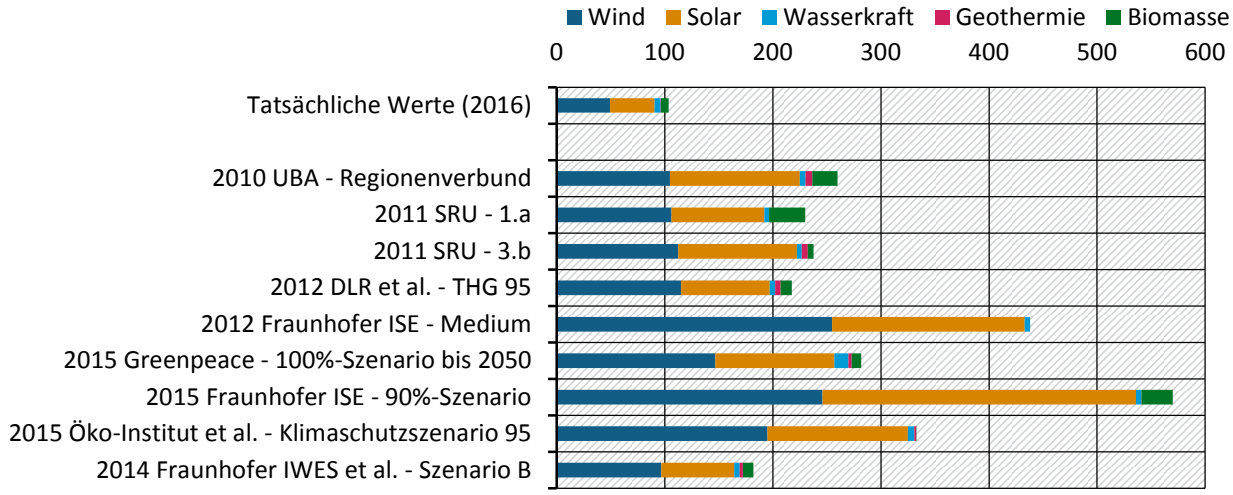
Ein weltweit wachsender Stromverbrauch stellt eine enorme Herausforderung an den Ausbau erneuerbarer Energien dar. Die installierte Leistung erneuerbarer Energieträger ist in fast allen betrachteten Szenarien ein endogenes Ergebnis der Modelle, häufig als Resultat einer Kostenoptimierung. Die Gesamtmenge an installierter Leistung der erneuerbaren Energien ist u. a. abhängig von Annahmen zum Potential der Energieträger, dem Energiebedarf, dem Einsatz von Flexibilitätsoptionen sowie dem Ambitionsgrad der angestrebten Szenarioziele. Auf welche Weise bzw. in welchem Mix die Leistung bereitgestellt wird, ist hingegen abhängig u. a. von den angenommenen Entwicklungen der Kosten und Lernkurven der verschiedenen verfügbaren Technologien.

Die im Jahr 2050 installierte Leistung der erneuerbaren Energien ist in Abbildung 13 für Deutschland abgetragen. Es wird deutlich, dass Wind- und Sonnenenergie in allen Szenarien die wichtigsten erneuerbaren Energiequellen darstellen. Die installierte Gesamtleistung der Erneuerbaren variiert jedoch teils erheblich. Fraunhofer ISE (2015, S. 7) beobachten in ihrer Studie einen Kipppunkt zwischen einem Zielwert von 80 und 90 % für die Absenkung der CO_2-Emissionen: „Die im 90-%-Szenario nur noch sehr geringe verfügbare Menge an fossilen Energieträgern bedingt, dass eine sehr große Menge an Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Sonne und Wind und eine große Menge an Speichern und

Anlagen zur Erzeugung synthetischer Energieträger benötigt wird“. Insbesondere die „fast ausschließlich durch elektrische Wärmepumpen bereitgestellt[e]“ (ebd., S. 33) Heizwärme erfordert in diesem Szenario eine höhere Leistung. Doch auch in den anderen Szenarien der Studie (nicht abgebildet) sind im Vergleich sehr hohe installierte Leistungen von EE notwendig (zwischen ca. 300 bis 400 GW).

In einigen Szenarien kommt auch Biomasse auf einen nicht unerheblichen Anteil. In den Szenarien „1.a“ (SRU 2011) und „90 %-Szenario“ (Fraunhofer ISE 2015) werden im Jahr 2050 rund 30 GW installierte Leistung erreicht. Demgegenüber steht das „Klimaschutzszenario 95“ (Öko-Institut/ Fraunhofer ISI 2015) mit lediglich 0,4 GW. Der reduzierte Biomasseeinsatz des Szenarios wird in erster Linie durch den verstärkten Einsatz stromgenerierter Kraftstoffe ersetzt. Die Reduktion ist dabei eine Voraussetzung des Szenarios und kein Ergebnis der Kostenoptimierung des Modells. Im Szenario „Medium“ (Fraunhofer ISE 2012) wird lediglich der Verbrauch an Biomasse (50 TWh) der Sektoren Strom und Gebäude angegeben, nicht jedoch die installierte Leistung. Der Verkehrssektor wird nicht betrachtet. Das Potential sowohl der Wasserkraft als auch der Geothermie in Deutschland wird von den meisten Studien als vergleichsweise gering eingestuft.

Abbildung 13: Installierte Leistung der erneuerbaren Energieträger in GW, Deutschland 2050



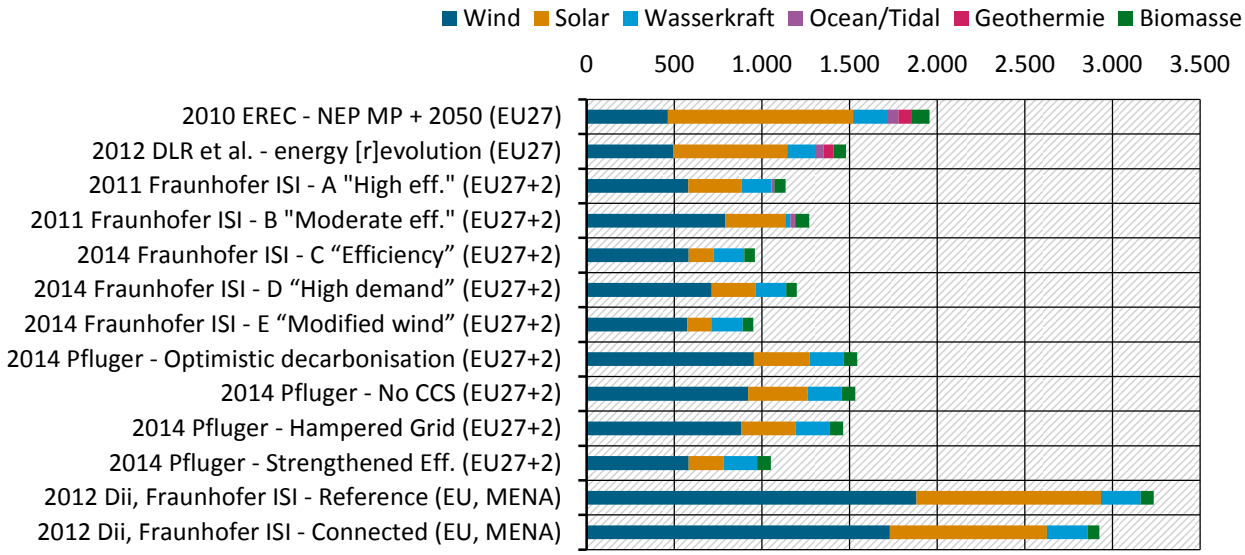
Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien; tatsächliche Werte für 2016 aus BMWi (2017)

Auch auf EU-Ebene dominieren Wind und Solar, jedoch in unterschiedlichen Verhältnissen (siehe Abbildung 14). Der Anteil der Windkraft liegt meist bei rund 60 %. Der Anteil der Solarenergie variiert zwischen 15 und 55 %. Wasserkraft spielt eine deutlich gewichtigere Rolle als in Deutschland. Zum Teil wird dabei die Leistung von Gezeiten- und Wellenkraftwerken (Ocean/Tidal) gesondert aufgeführt. Die insgesamt installierte Leistung der erneuerbaren Energien liegt in den meisten hier abgebildeten Szenarien für die EU27 und EU27+2 (27 Mitgliedstaaten plus Schweiz und Norwegen) zwischen rund 1.000 und 1.500 GW. Die beiden Szenarien in Dii/Fraunhofer ISI (2012) nehmen in ihrer Betrachtung die MENA-Region (Nahost und Nordafrika) hinzu und erreichen daher deutlich höhere installierte Leistungen.

Die städtischen und regional begrenzten Szenarien (vgl. Textbox in Abschnitt 1.2) verdeutlichen die geographischen Unterschiede und damit einhergehenden Potentiale verschiedener Energieträger. In den Szenarien für Hannover und Bayern spielen Wind- und Solarenergie, wie in den Szenarien für Deutschland insgesamt (vgl. Abbildung 13), eine zentrale Rolle und machen mit Abstand den Großteil der installierten Leistung der erneuerbaren Energien aus. In der Region Hannover sollen im Jahr 2050 44 % des Stroms mit Solarenergie erzeugt werden. 45 % stammen aus Windenergie, die in der Region besonders hohe Potentiale aufweist. Die Biogaserzeugung deckt den Rest (Landeshauptstadt und Re-

gion Hannover 2013). Im Gegensatz dazu ist das Potential der Windkraft in Berlin aufgrund des Flächenbedarfs sehr gering, und Photovoltaik muss entsprechend stärker ausgebaut werden, weil sie flächensparend in die Stadt eingebunden werden kann (PIK et al. 2014). Um den ambitionierten Ausbau der Solarenergie voranzutreiben, schlägt die Studie die Erstellung eines Masterplans „Solarhauptstadt Berlin“ vor, der die drei Kernthemen Information und Vernetzung, Forschung und innovative Leitprojekte behandelt (ebd., S. 187). Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung erreicht im Szenario dennoch etwas weniger als 50 %. Die Stromversorgung der Stadt Seattle sieht aufgrund der geographischen Gegebenheiten gänzlich anders aus. Bereits heute bezieht die Stadt fast ausschließlich emissionsfreien Strom aus Wasserkraft (Lazarus et al. 2011). Im Szenario sind jedoch erhebliche Energieeinsparungen und der Ausbau der Photovoltaik nötig, um auch den zukünftigen Bedarf weiterhin emissionsfrei decken zu können.

Abbildung 14: Installierte Leistung der erneuerbaren Energieträger in GW, EU27+X 2050



Eigene Darstellung auf Grundlage der abgebildeten Studien

2.5 Fazit der Gegenüberstellung und Handlungsansätze

Die Gegenüberstellung der Szenarien zeigt, dass das Erreichen der vorgegebenen Ziele zur Dekarbonisierung theoretisch möglich ist. Das ist zunächst nicht überraschend, da genau das die Vorgabe eines jeden Zielszenarios ist. Die eigentliche Frage lautet daher, auf welche Weise die Ziele erreicht werden können. Die Szenarien unterscheiden sich zum Teil deutlich in einigen Annahmen und methodischen Herangehensweisen, in der Tendenz ergeben sich aber häufig ähnliche Entwicklungen und Handlungsfelder. Die Analyse der Szenarien ermöglicht einen Vergleich verschiedener Strategien.

Ein Großteil der Treibhausgasminderung wird in den meisten Szenarien durch die Steigerung der Effizienz und die Reduktion des Energieverbrauchs erreicht. Zum Teil sind dabei erhebliche Fortschritte notwendige Voraussetzung für das Erreichen der Ziele. Finden diese Fortschritte in unzureichender Tiefe und Breite statt, steigen die Anforderungen an den Ausbau der erneuerbaren Energien und damit auch die Kosten und Schwierigkeiten der Dekarbonisierung zum Teil deutlich an.

Trotz der darin gezeigten theoretischen Machbarkeit werden viele Zielszenarien aufgrund der zur Realisierung nötigen Anstrengungen selbst von ihren Autorinnen und Autoren als eher unwahrscheinlich eingeschätzt. Alle Referenzszenarien, die meist eine Trendfortschreibung annehmen oder von den aktuellen Rahmenbedingungen ausgehen, verfehlen die Ziele deutlich und untermauern somit den Handlungsdruck. Zeitnahe Maßnahmen bringen in einigen Szenarien erhebliche Vorteile u. a. in Bezug auf

die langfristige Erreichbarkeit der Zielvorgaben und die Kosten der Dekarbonisierung. Fahrpläne mit klaren zeitlichen Vorgaben, z. B. für politische Maßnahmen, existieren aber nur in wenigen Studien. Darüber hinaus sind viele Entwicklungen, z. B. des technologischen Fortschritts, mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die verschiedenen Sektoren leisten in den Szenarien einen teils sehr unterschiedlichen Beitrag zur Dekarbonisierung. Es wird aber deutlich, dass die meisten Studien ähnliche Herausforderungen identifizieren. Der Stromsektor kann in vielen Szenarien fast vollständig dekarbonisiert werden und ist für die Energiewende daher zentral. Andere Bereiche müssen zunehmend elektrifiziert werden, um den Einsatz erneuerbarer Energien anstelle fossiler Kraft- und Brennstoffe zu ermöglichen. Für den Verkehrssektor ist das technisch denkbar, jedoch bestehen noch einige Unsicherheiten bezüglich der einzusetzenden Technologien. In jedem Fall muss der Energiebedarf des Sektors möglichst gering gehalten werden. Die Elektrifizierung des Wärmesektors gestaltet sich noch schwieriger, und viele Potentiale können nur mit strukturellen Veränderungen gehoben werden. Auch hier gilt, dass gleichzeitig zum Einsatz alternativer Technologien der Energiebedarf grundsätzlich minimiert werden muss.

Infolge der zunehmenden Elektrifizierung der Sektoren Verkehr und Wärme nimmt der Stromverbrauch in vielen Szenarien trotz insgesamt sinkenden Energiebedarfs zu. Diese Verlagerung des Energieverbrauchs ist notwendig für die Substituierung der fossilen Energieträger, stellt jedoch den Stromsektor vor zusätzliche Herausforderungen bezüglich des Ausbaus der Erneuerbaren. Je nach Strategie steigt vor allem der Strombedarf des Verkehrssektors im Zeitverlauf bis 2050 in einigen Szenarien extrem an.

Die Implikationen verschiedener Strategien, Fortschritte und Maßnahmen – oder auch das Fehlen solcher – wurden in der vorliegenden Analyse nicht näher untersucht. Eine Vertiefung der Analyse ist daher in viele Richtungen denkbar. Beispielsweise könnte eine Erweiterung um den Bereich der Investitionskosten einen großen Mehrwert bedeuten. Die Kosten der fossilen und erneuerbaren Energien sind ein fundamentaler Baustein vieler Szenariomodelle, wurden im Rahmen dieser Analyse jedoch nicht genauer betrachtet. Schwierigkeiten könnten sich aufgrund teils geringer Transparenz sowie uneinheitlicher Vergleichsgrößen und Definitionen ergeben. Darüber hinaus könnten auch wirtschaftliche und soziale Auswirkungen der Dekarbonisierung gegenübergestellt werden. Letztere finden aber nur sehr selten Berücksichtigung in den Studien.

Eine vertiefte Analyse ist ebenfalls für weitere Sektoren sinnvoll. Die Bereiche Landwirtschaft, LULUCF sowie nicht-energiebedingte Emissionen wurden weitestgehend vernachlässigt, werden allerdings in nur wenigen Studien in ausreichender Tiefe behandelt. In Zukunft könnten die hier gesammelten Daten für systematische Auswertungen der tatsächlichen Fortschritte im Vergleich zu den betrachteten Szenarien genutzt werden.

3 Dokumentation der Datenbank

3.1 Voraussetzungen und Installation

Systemvoraussetzungen

- Windows PC mit Microsoft Windows 7 Professional 32/64bit oder neuer
- Bis zu 20 MB freier Festplattenspeicher
- Microsoft Access 2013
- Bildschirm mit einer Auflösung von mind. 1680 x 1050 (Empfehlung: 1920 x 1080, Full HD)

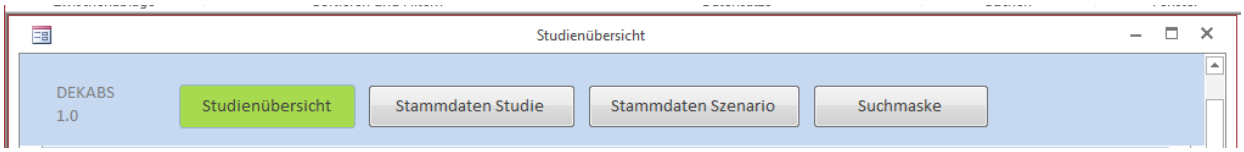
Installation

Die MS Access-Datenbankanwendung DEKABS 1.0 kann direkt ohne Installation benutzt werden.

3.2 Benutzung

DEKABS 1.0 stellt Ihnen verschiedene Ansichten zum Durchblättern und Exportieren von Studien und zugehörigen Szenarien zur Dekarbonisierung zur Verfügung. Hierzu benutzen Sie vier verschiedene Masken, die Ihnen im Folgenden kurz erläutert werden.

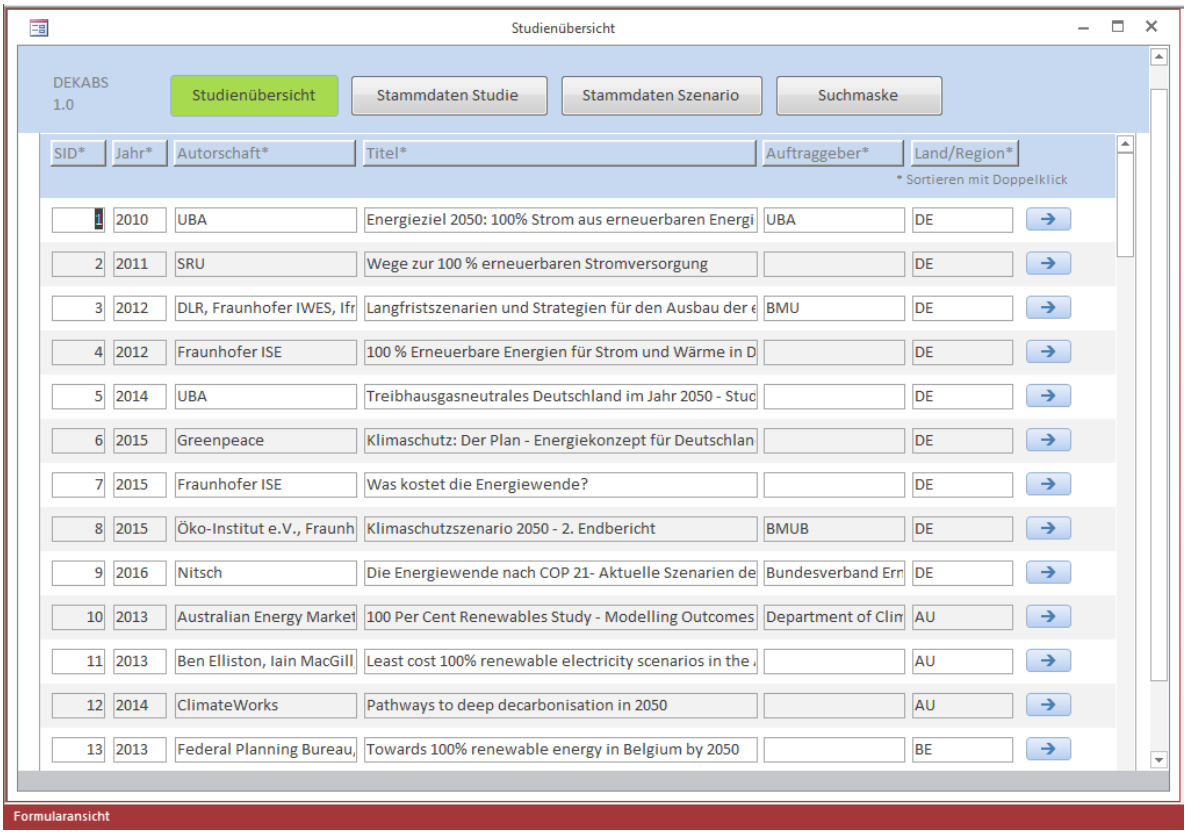
- Starten Sie zunächst die Datenbankanwendung „DEKABS1.0.accde“ mit einem Doppelklick.
- Falls Ihnen ein PopUp mit einer Sicherheitswarnung angezeigt wird, klicken Sie bitte auf die Schaltfläche „Öffnen“.
- Zwischen den einzelnen Masken können Sie über die Schaltflächen in der Kopfzeile wechseln:



- Alle Masken sind Einzelfenster und können verschoben bzw. parallel geöffnet werden.

Studienübersicht

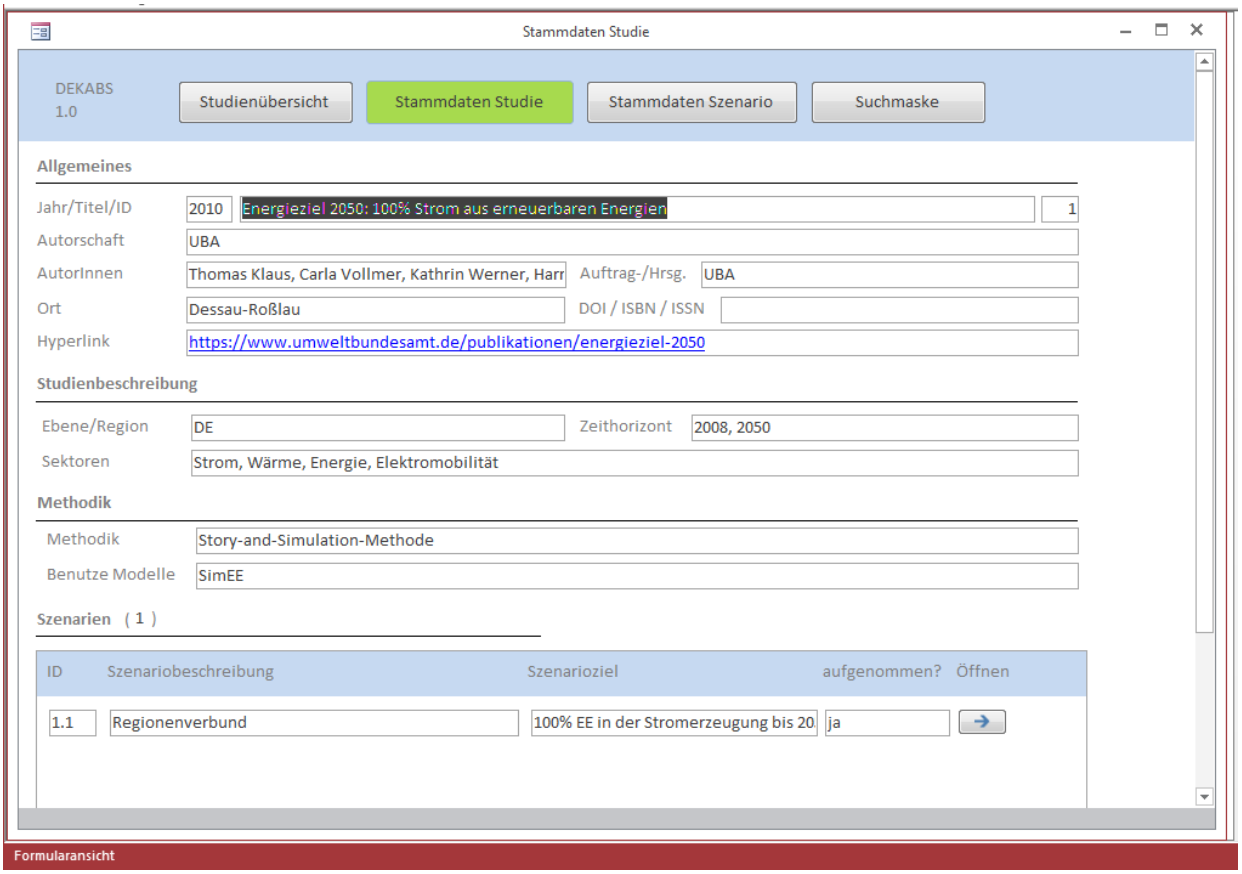
DEKABS 1.0 startet mit der Maske Studienübersicht. Sie sehen alle erfassten Studien, wobei Sie die Möglichkeit haben, mit einem Doppelklick auf die Spaltenüberschriften zu sortieren:



- Mit den blauen Pfeilen gelangen Sie zum Stammdatenblatt der jeweiligen Studie.
- Gehen Sie immer den Weg über die Maske „Studienübersicht“, um das Stammdatenblatt einer *Studie* zu öffnen.

Stammdaten Studie

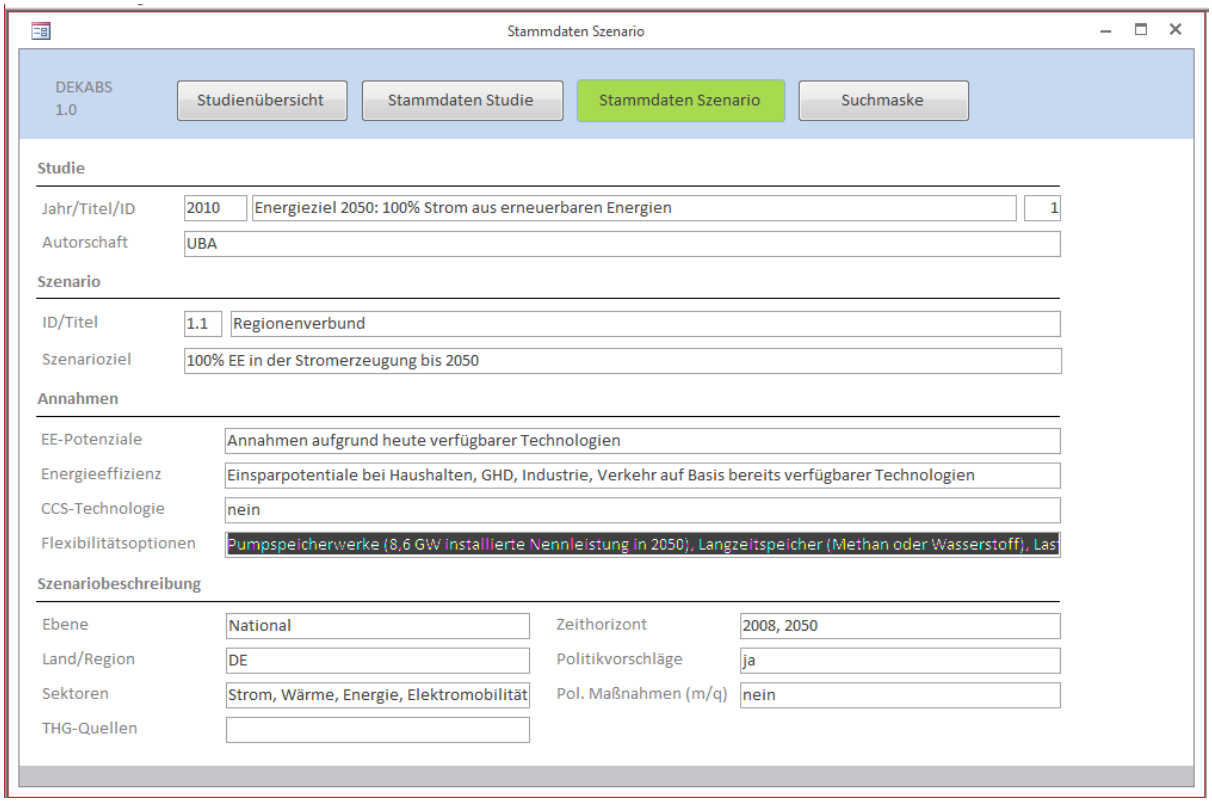
In dieser Maske sehen Sie alle relevanten Eckdaten zur Studie sowie Anzahl, Titel und Zielsetzungen der Szenarien, die diese Studie enthält:



- Mit den blauen Pfeilen gelangen Sie zum Stammdatenblatt des jeweiligen Szenarios.
- Sie können nur diejenigen Szenarien öffnen, die in der Spalte „aufgenommen?“ ein „ja“ enthalten.
- Gehen Sie immer den Weg über die Masken „Studienübersicht“ und „Stammdaten Studie“, um das Stammdatenblatt eines *Szenarios* zu öffnen.

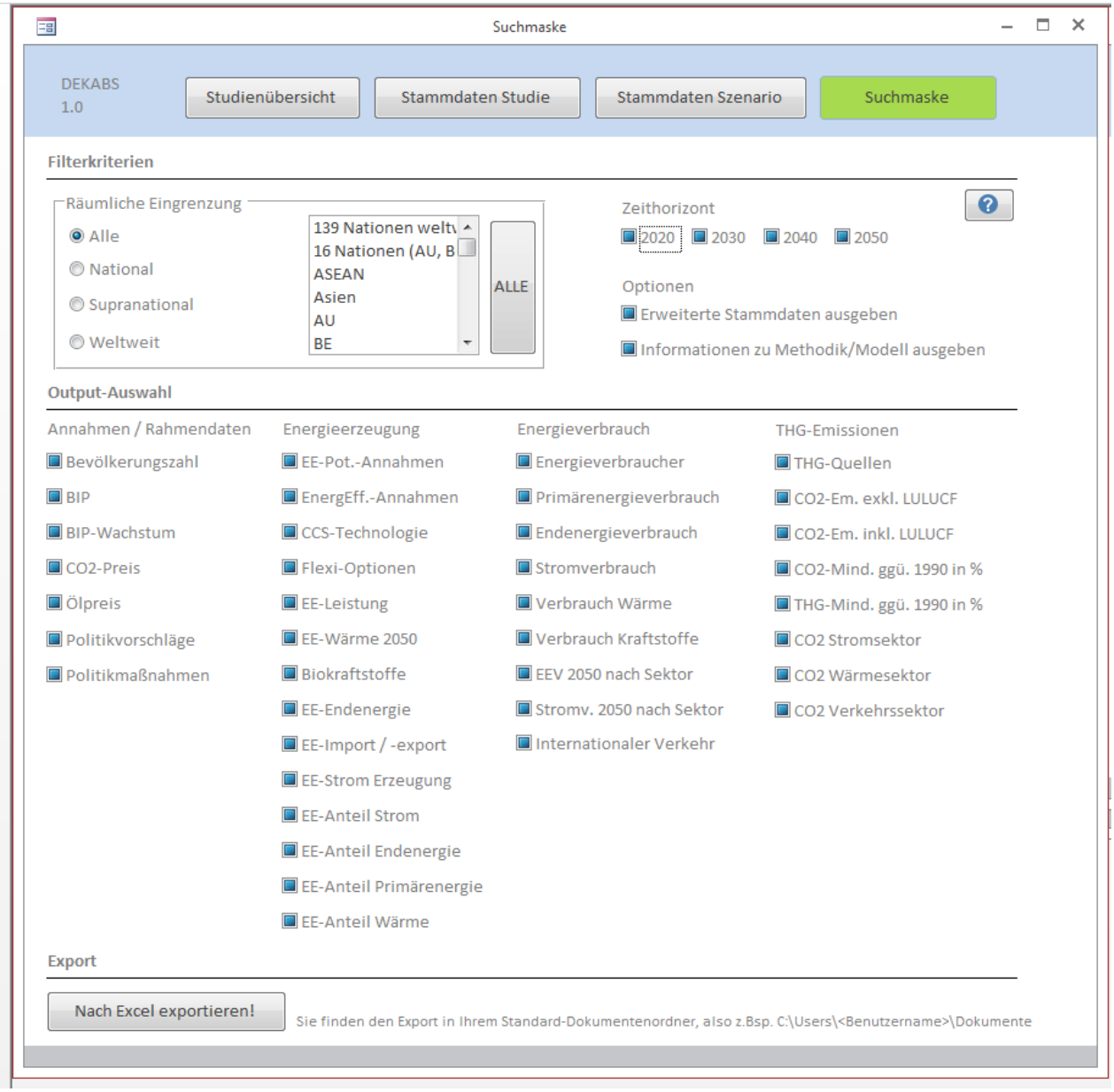
Stammdaten Szenario

In dieser Maske sehen Sie alle relevanten Eckdaten des Szenarios, das Sie aus dem Stammdatenblatt zur Studie geöffnet haben.



Suchmaske

Die Suchmaske ist das Herzstück der Datenbank. Hier können Sie gezielt nach relevanten Studien und den zugehörigen Szenarien zur Dekarbonisierung suchen und sich die gewünschten Daten nach MS Excel exportieren.



- In den Filterkriterien legen Sie eine räumliche Eingrenzung sowie den Zeithorizont fest, den die zu exportierenden Studien und Szenarien abdecken sollen. Die räumliche Eingrenzung nehmen Sie per Klick im Listenfeld vor, für den abzudeckenden Zeithorizont aktivieren Sie die entsprechenden Kontrollkästchen.
- Die Optionen zu erweiterten Stammdaten und verwendeter Methodik/Modell liefern Ihnen zusätzliche Informationen, wie zum Beispiel ISBN-Nummern, Auftraggeber oder verwendete Modelle.
- Bei der Output-Auswahl legen Sie fest, welche Daten Sie exportieren möchten. Per Mouseover über die Texte oder durch Anklicken der Schaltfläche mit dem Fragzeichen erhalten Sie Hilfe zu den einzelnen Punkten, wenn Sie sich nicht sicher sind, was mit der Option gemeint ist.

- Nach Beendigung Ihrer Auswahl klicken Sie auf die Schaltfläche „Nach Excel exportieren!“.
- Sie erhalten eine Bestätigung mit dem Dateinamen des Exports.
- Die Exporte werden nach Datum und Uhrzeit benannt und in Ihrem Stammdokumentenordner abgelegt. Hierbei handelt es sich auf Windows-PCs in der Regel um den Ordner „Dokumente“ im Pfad „Bibliotheken\Dokumente“. Navigieren Sie mit dem Windows-Explorer zu diesem Ordner, um den Excel-Export zu öffnen. Der neueste Export in diesem Ordner ist immer der zuletzt exportierte.
- Verarbeiten Sie die exportierten Daten in Excel oder anderen Programmen weiter.
- Aufgrund der großen Anzahl an verfügbaren Outputvariablen empfiehlt es sich der Übersichtlichkeit halber, nicht alle Variablen auszugeben, wenngleich dies möglich ist.

3.3 Support

Für die Benutzung von DEKABS 1.0 wird kein Support gewährt.

4 Quellenverzeichnis

AEA (2011): Pathways to 2050. Abrufbar unter: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48072/2290-pathways-to-2050-key-results.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Australian Energy Market Operator (2013): 100 Per Cent Renewables Study - Modelling Outcomes. Abrufbar unter: https://www.environment.gov.au/system/files/resources/d67797b7-d563-427f-84eb-c3bb69e34073/files/100-percent-renewables-study-modelling-outcomes-report.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

BMWi (2017): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: Februar 2017). Abrufbar unter: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2016-excel.xlsx;jsessionid=16D564184903691B70CEEBBB27C27B84?__blob=publicationFile&v=10. Letzter Zugriff am: 17.8.2017.

Breyer, C., Barbosa, L. D. S. N. S., Bogdanov, D., Vainikka, P. (2015): Complementarity of hydro, wind and solar power as a base for a 100% RE energy supply: South America as an example. Abrufbar unter: https://www.researchgate.net/publication/308900734. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Budischak, C., Sewell, D., Thomson, H., Mach, L., Veron, D. E., Kempton, W. (2013): Cost-minimized combinations of wind power, solar power and electrochemical storage, powering the grid up to 99.9% of the time. In: Journal of Power Sources. Jg. 225, S. 60–74.

Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin.

ClimateWorks (2014): Pathways to deep decarbonisation in 2050. Abrufbar unter: http://www.climateworksaustralia.org/sites/default/files/documents/publications/climateworks_pdd2050_initialreport_20140923.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Danish Commission on Climate Change Policy (2010): Green Energy - The Road To A Danish Energy System Without Fossil Fuels. Abrufbar unter: http://www.ens.dk/sites/ens.dk/files/dokumenter/publikationer/downloads/green_energy.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Dii, Fraunhofer ISI (2012): 2050 Desert Power. Abrufbar unter: http://desertenergy.org/wp-content/uploads/2015/09/dp2050_study_web.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

DLR, IWES, Fraunhofer IFNE (2012a): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Abrufbar unter: http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf. Letzter Zugriff am: .

DLR, Universität Utrecht, Ludwig-Bölkow Systemtechnik, Institute for Sustainable Futures (University of Technology, Sydney), energynautics (2012b): energy [r]evolution - A Sustainable EU 27 Energy Outlook. Abrufbar unter: http://www.greenpeace.org/eu-unit/Global/eu-unit/reports-briefings/2012%20pubs/Pubs%203%20Jul-Sep/E%5bR%5d%202012%20lr.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

ECF (2010): Roadmap 2050 - A practical guide to a prosperous, low-carbon Europe. Abrufbar unter: http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1_fullreport_PressPack.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

ECF, KEMA, Energy Future Lab, Regulatory Assistance Project (RAP), E3G (2011): Power Perspectives 2030 - On the road to a decarbonised power sector. Abrufbar unter: http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/PowerPerspectives2030_FullReport.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Elliston, B., MacGill, I., Diesendorf, M. (2013): Least cost 100% renewable electricity scenarios in the Australian National Electricity Market. In: Energy Policy. Jg. 59, S. 270–282.

EREC (2010): RE-thinking 2050 - A 100% Renewable Energy Vision for the European Union. Abrufbar unter: http://www2.warwick.ac.uk/fac/soc/pais/research/researchcentres/csgr/green/foresight/energyenvironment/2010_erec_rethinkhing_2050.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Federal Planning Bureau, ICEDD, vito (2013): Towards 100% renewable energy in Belgium by 2050. Abrufbar unter: https://emis.vito.be/sites/emis.vito.be/files/articles/1125/2013/Rapport_100_procent_Duurzame_Energie.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Fraunhofer ISE (2012): 100 % Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland. Abrufbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-100-erneuerbare-energien-in-deutschland.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Fraunhofer ISE (2015): Was kostet die Energiewende?. Abrufbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-was-kostet-die-energiewende.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Fraunhofer ISI (2011): EU Long-term scenarios 2050 - Tangible ways towards climate protection in the European Union. Abrufbar unter: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/publikationen/Final_Report_EU-Long-term-scenarios-2050_FINAL.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Fraunhofer ISI (2014): EU Long-term scenarios 2050 II - Optimized pathways towards ambitious climate protection in the European electricity system. Abrufbar unter: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/en/projects/Optimized-pathways-final.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Fraunhofer IWES, IAEW RWTH Aachen, Stiftung Umweltenergierecht (2014): Roadmap Speicher. Abrufbar unter: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_FVEE/14.IWES_Roadmap-Speicher/14_IWES-etal_Roadmap_Speicher_Langfassung.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Greenpeace, Global Wind Energy Council, SolarPowerEurope (2015): energy [r]evolution - A Sustainable World Energy Outlook 2015. Abrufbar unter: http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2015/Energy-Revolution-2015-Full.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Greenpeace (2015): Klimaschutz: Der Plan - Energiekonzept für Deutschland. Abrufbar unter: http://www.greenpeace.de/files/publications/klimaschutz-der-plan-greenpeace-20151117.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Greenpeace, EREC (2010): energy [r]evolution - a sustainable energy outlook for Canada. Abrufbar unter: http://www.greenpeace.org/canada/Global/canada/report/2010/9/E%5BR%5Dcanada.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

Greenpeace, EREC (2013): energy [r]evolution - a sustainable ASEAN energy outlook. Abrufbar unter: http://www.greenpeace.org/seasia/ph/PageFiles/547198/Energy-Revolution-ASEAN.pdf. Letzter Zugriff am: 28.2.2017.

IDDRI, SDSN (2015): Pathways to deep decarbonisation in 2050 - 2015 report. Abrufbar unter: http://deepdecarbonization.org/ddpp-reports/. Letzter Zugriff am: 7.10.2016.

IEA, Nordic Energy Research (2016): Nordic Energy Technology Perspectives 2016: Cities, flexibility and pathways to carbon-neutrality. Paris; Copenhagen K.

IVL Swedish Environmental Research Institute (2011): Energy Scenario for Sweden 2050 Based on Renewable Energy Technologies and Sources. Abrufbar unter: http://www.wwf.se/source.php/1409709/Energy%2520Scenario%2520for%2520Sweden%25202050_bakgrundsrapport%2520IVL_sep%25202011.pdf%20. Letzter Zugriff am: 7.10.2016.

Landeshauptstadt und Region Hannover (2013): Masterplan Stadt und Region Hannover | 100 % für den Klimaschutz. Abrufbar unter: http://www.hannover.de/Leben-in-der-Region-Hannover/Umwelt-Nachhaltigkeit/Klimaschutz-Energie/Klimaschutzregion-Hannover/Masterplan-100-f%C3%BCr-den-Klimaschutz/Ergebnisse. Letzter Zugriff am: .

Lazarus, M./Erickson, P./Chandler, C./Daudon, D./Donegan, S./Gallivan, F./Ang-Olson, J. (2011): Getting to Zero: A Pathway to a Carbon Neutral Seattle. Abrufbar unter: http://www.energycommunity.org/documents/SEISeattleZeroCarbon2011.pdf. Letzter Zugriff am: .

Leipziger Institut für Energie (2012): Bayerische Energieszenarien 2050. Abrufbar unter: https://www.energie-innovativ.de/fileadmin/user_upload/stmwivt/Publikationen/Endbericht_Bayerische_Energiezenarien_2050.pdf. Letzter Zugriff am: .

Lund, H., Hvelplund, F. K., Mathiesen, B. V., Aalborg Univ. Dept. of Development and Planning (2011): Coherent energy and environmental system analysis. A strategic research project financed by The Danish Council for Strategic Research Programme Commission on Sustainable Energy and Environment. Abrufbar unter: http://www.ceesa.plan.aau.dk/publications/main-report-background-reports/. Letzter Zugriff am: 7.10.2016.

Nitsch, J. (2016): Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. Abrufbar unter: http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Joachim_Nitsch_Energiewende_nach_COP21.pdf. Letzter Zugriff am: 22.7.2016.

NREL (2012): Renewable Electricity Futures Study. Abrufbar unter: http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/52409-ES.pdf. Letzter Zugriff am: 7.10.2016.

Öko-Institut, Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Abrufbar unter: http://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf. Letzter Zugriff am: 4.8.2016.

Pfluger, B. (2014): Assessment of least-cost pathways for decarbonising Europe's power supply : a model-based long-term scenario analysis accounting for the characteristics of renewable energies. Abrufbar unter: https://doi.org/10.5445/KSP/1000037155. Letzter Zugriff am: 23.2.2017.

PIK, IÖW, BLS, innoZ (2014): Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050. Abrufbar unter: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/klimaschutz/studie_klimaneutrales_berlin/download/Machbarkeitsstudie_Berlin2050_Hauptbericht.pdf. Letzter Zugriff am: .

SRU (2011): Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung: Sondergutachten, Januar 2011. Berlin.

Statistisches Bundesamt (2017): Monatsbericht über die Elektrizitätsversorgung. Abrufbar unter: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/BilanzElektrizitaetsversorgung.html. Letzter Zugriff am: 8.3.2017.

UBA (2010): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Energien. Abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energieziel-2050. Letzter Zugriff am: 7.10.2016.

UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland 2050. Abrufbar unter: http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050-0. Letzter Zugriff am: 10.8.2015.

WWF, IES, MKE (2016): Power Sector Vision 2050 - Toward 100% Renewable Energy by 2050. Abrufbar unter: http://wwf.panda.org/what_we_do/where_we_work/greatermekong/our_solutions/2050powersectorvision/. Letzter Zugriff am: 7.10.2016.

WWF, TERI (2013): The Energy Report - India 100% Renewable Energy By 2050. Abrufbar unter: http://awsassets.wwfindia.org/downloads/the_energy_report_india.pdf. Letzter Zugriff am: 7.10.2016.

5 Anhang

Tabelle 2: Szenarioziele

Studie	Szenario	Ziel
UBA 2010	Regionenverbund	100 % EE in der Stromerzeugung 2050
SRU 2011	1.a	100 % EE-Strom bis 2050, autark
SRU 2011	3.b	100 % EE-Strom bis 2050, DE-EUNA
DLR et al. 2012a	THG 95	95 % THG-Minderung von 95 % bis 2050
Fraunhofer ISE 2012	Medium	100 % EE für Strom und Wärme bis 2050
Fraunhofer IWES et al. 2014	Szenarien A, B und C	88 % EE
UBA 2014	THGND 2050	95 % THG-Minderung bis 2050
Greenpeace et al. 2015	100 %-Szenario bis 2050	100 % EE bis 2050
Fraunhofer ISE 2015	90 %-Szenario	90 % THG-Reduktion
Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2015	Klimaschutzszenario 95	95 % THG-Minderung bis 2050
Nitsch 2016	Szen-16 "KLIMA 2050"	100 % EE bis 2050, 95 % THG-Minderung
Nitsch 2016	Szen-16 "Klima 2040"	100 % EE bis 2040, 2° C-Marke
Australian Energy Market Operator 2013	Szenarien 1 und 2	100 % EE bis 2030/2050
Elliston et al. 2013	Low cost scenario, (5 % discount); high cost scenario (10 %)	100 % EE bis 2030
ClimateWorks 2014	DDPP scenario	THG-Minderung von 80-100 % bis 2050
Federal Planning Bureau et al. 2013	100 % RES (DOM, DEM, GRID, BIO, PV, WIND)	100 % EE
Danish Commission on Climate Change Policy 2010	Keine fossilen Energieträger, THG-Minderung von 80-95 %	Keine fossilen Energieträger, THG-Minderung von 80-95 %
Lund et al. 2011	CEESA-2050 (realistic and recommendable)	100 % EE bis 2050
WWF/TERI 2013	Renewable Energy Scenario (REN)	100 % EE bis 2050
Greenpeace/EREC 2010	advanced energy [r]evolution scenario	94 % CO_2-Minderung (energiebedingt) bis 2050
IVL Swedish Environmental Research Institute 2011	A Swedish 2050 energy scenario	100 % EE bis 2050
NREL 2012	Exploratory Scenario 90 %	90 % EE bis 2050
Budischak et al. 2013	combinations of renewable electricity sources (90 % and 99,9 % coverage)	ca. 100 % EE (mit fossilem Backup)
AEA 2011	DECC-1A	90 % CO_2-Minderung bis 2050
AEA 2011	DECC-1A-IAB-2A	Equal-annual % CO_2 reduction 2050 (90 %)
ECF 2010	100 % RES	100 % THG-Minderung bis 2050; 100 % RES
EREC 2010	NEP MP + 2050, NEP HP + 2050 Aeff	100 % EE Energieversorgung bis 2050
ECF et al. 2011	On Track case (main scenario)	Vollständige Dekarbonisierung des Energiesektors - THG-Minderung von 80 %, bis zu 100 % EE bis 2050
Fraunhofer ISI 2011	A "High efficiency", B "Moderate efficiency"	95 % THG-Minderung bis 2050
DLR et al. 2012b	energy [r]evolution scenario	95 % THG-Minderung bis 2050, 96 % EE
Dii/Fraunhofer ISI 2012	Reference, Connected	>90 % EE
Fraunhofer ISI 2014	Szenarien C, D und E	95 % THG-Minderung bis 2050
Pfluger 2014	OPT, NoCCS, GRID, EFF	95 % THG-Minderung bis 2050

Studie	Szenario	Ziel
IEA/Nordic Energy Research 2016	Nordic Carbon-Neutral Scenario (CNS)	100 % EE Stromerzeugung bis 2045 und THG-Minderung von 85 % bis 2050
Greenpeace/EREC 2013	energy [r]evolution scenario	Über 90 % EE bis 2050
WWF et al. 2016	Advanced Sustainable Energy Scenario (ASES)	100 % EE bis 2050, zero emissions
Breyer et al. 2015	100 % Renewable Energy System – integrated	100 % EE bis 2030
Greenpeace et al. 2015	advanced energy [r]evolution scenario	100 % EE bis 2050
IDDRI/SDSN 2015	-56 % THG bis 2050 (<2 Grad Ziel)	THG Minderung von ca. 56 % bis 2050 (=Erreichen von 2 Grad Ziel in 2050)