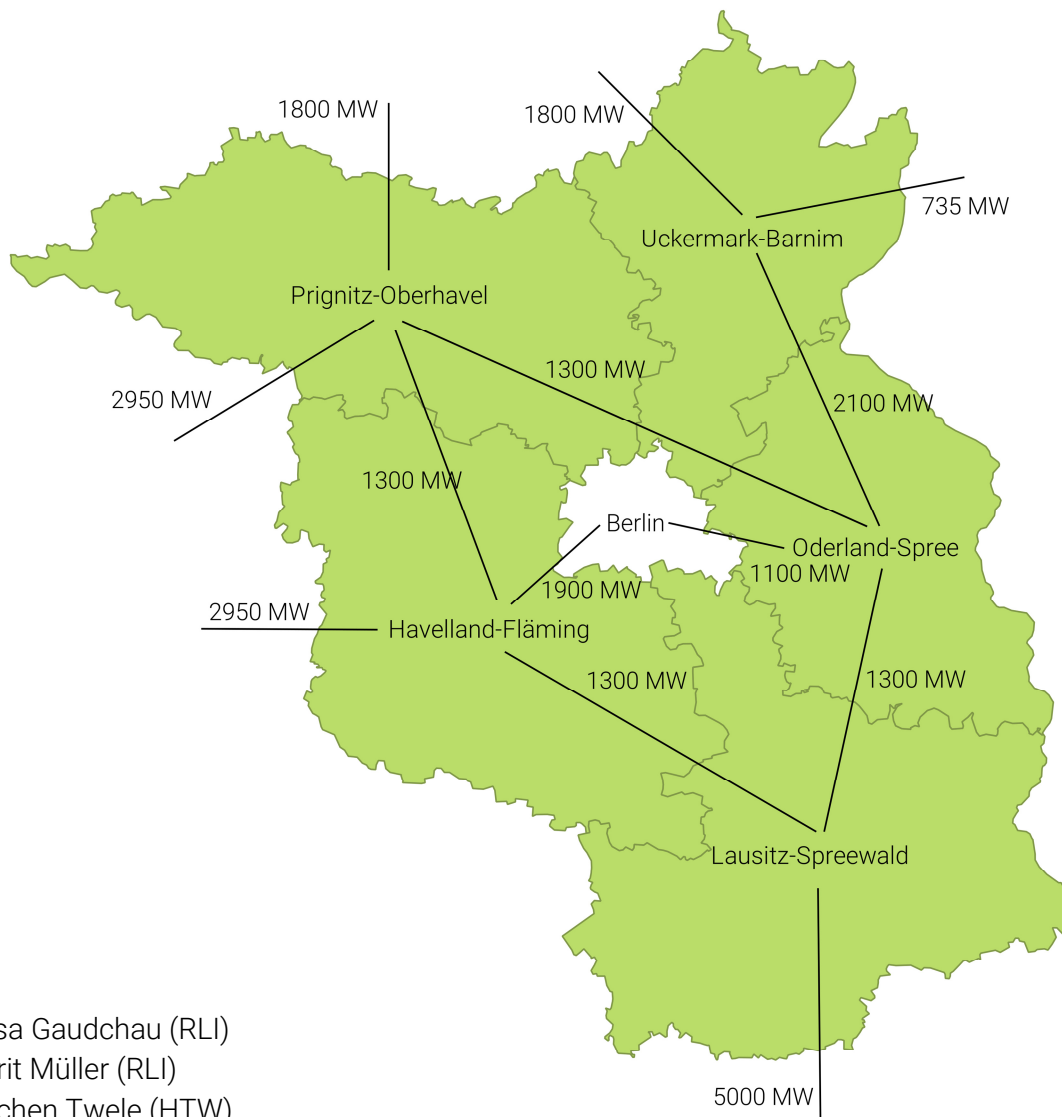


Untersuchungen zur Energiestrategie Brandenburgs

Reiner Lemoine Institut gGmbH (RLI) und Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW Berlin)

im Auftrag der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen
im Brandenburger Landtag



Elisa Gaudchau (RLI)
Berit Müller (RLI)
Jochen Twele (HTW)

unter Mitwirkung von:
Birgit Schachler (RLI)
Jens Fortmann (HTW)

Januar 2017

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	2
Abkürzungsverzeichnis.....	2
Einleitung.....	3
Szenario 1: Energiestrategie 2030.....	4
Erneuerbare Energien	4
Energieeinsparungen	5
Export.....	6
Elektromobilität.....	6
CO ₂ -Emissionen.....	6
Kraftwerkspark.....	6
Ergebnisse Szenario 1	8
Szenarien 2 und 3	9
Energieeinsparungen.....	9
Export.....	10
CO ₂ -Emissionen.....	10
Kraftwerkspark.....	11
Ergebnisse Szenarien 2 und 3.....	11
Netze und Speicher	13
CO ₂ -Emissionen	15
Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.....	17
Konventionelle Kraftwerke.....	17
Senkung des Energieverbrauchs	17
Technologien.....	18
Ausbau Erneuerbarer Energien	18
Weiterführende Informationen zum Modell und den verwendeten Daten.....	19
Quellen	20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Regionen und Austauschleistungen	4
Abbildung 2: Senkung des Endenergieverbrauchs	5
Abbildung 3: Kapazitäten der FEE im Jahr 2030	7
Abbildung 4: Kapazitäten der thermischen Kraftwerke im Jahr 2030.....	7
Abbildung 5: Potenzial und Auslastung der Strom- und Wärmeerzeugung Szenario 1	8
Abbildung 6: Stromerzeugung nach Regionen Szenario 1	9
Abbildung 7: Szenarienvergleich: Energiebedarf und Stromexport.....	10
Abbildung 8: Potenzial und Auslastung der Strom- und Wärmeerzeugung Szenario 2	11
Abbildung 9: Potenzial und Auslastung der Strom- und Wärmeerzeugung Szenario 3	12
Abbildung 10: Stromerzeugung nach Regionen Szenario 2 und 3.....	13
Abbildung 11: Jahresdauerlinien der Stromübertragung von LS nach OS	14
Abbildung 12: Jahresdauerlinien der Stromübertragung von LS nach SN	14
Abbildung 13: spezifische CO ₂ -Emissionen.....	16
Abbildung 14: CO ₂ -Emissionen und Endenergie	16

Abkürzungsverzeichnis

BE	Berlin
BB	Brandenburg
CCS	carbon dioxide capture and storage
ES 2030	Energiestrategie 2030 des Landes Brandenburg
FEE	Fluktuierende Erneuerbare Energien
GWh	Gigawattstunden
HF	Havelland-Fläming
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LS	Lausitz-Spreewald
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunden
OS	Oderland-Spree
PO	Prignitz-Oberhavel
PV	Photovoltaik
RLI	Reiner Lemoine Institut gGmbH
TWh	Terawattstunden
UB	Uckermark-Barnim

Einleitung

Das Land Brandenburg hat sich mit seiner Energiestrategie 2030 [MWE 2012] konkrete Ziele für seine zukünftige Energieversorgung gesetzt. Vor allem durch massive Energieeinsparungen und den Ausbau Erneuerbarer Energien sollten bis 2030 72 % der CO₂-Emissionen gegenüber 1990 eingespart werden. Für das Braunkohlekraftwerk Schwarze Pumpe wurden Effizienzsteigerungen vorgesehen; am Standort Jänschwalde sollte ein „gegebenenfalls erforderliches“ [MWE 2012, S. 43] Nachfolgebraunkohlekraftwerk nicht ohne Einsatz von CCS (carbon dioxide capture and storage¹) entstehen.

Die Rahmenbedingungen für die Energiestrategie haben sich inzwischen in einigen Punkten geändert: Der Einsatz von CCS bei der Energiegewinnung gilt heute als wirtschaftlich nicht darstellbar und politisch nicht durchsetzbar. Ein Nachfolgebraunkohlekraftwerk für Jänschwalde ist damit nicht mit den Zielen der Energiestrategie vereinbar. Aus Klimaschutzgründen wurde bereits die Abschaltung zweier 500 MW-Blöcke des Kraftwerks Jänschwalde in 2018 und 2019 angeordnet. Es wird davon ausgegangen, dass bis 2030 auch die restlichen Blöcke in Jänschwalde abgeschaltet werden.

Auch die in der Energiestrategie genannten Ziele zur Verringerung des Energieverbrauchs erscheinen aus heutiger Sicht nur noch schwer erreichbar.

Um die Auswirkungen der Ziele der Energiestrategie 2030 sowie Veränderungen der politisch-ökonomischen Rahmenbedingungen in Bezug auf die Braunkohlenutzung konkret bewerten zu können, wird in der vorliegenden Studie mit einem umfassenden Energiesystemmodell die mögliche Energieversorgung Brandenburgs 2030 in Anlehnung an die Energiestrategie 2030 berechnet. Das verwendete Modell berücksichtigt neben Wärmebedarf und -erzeugung alle Arten der Stromerzeugung und den prognostizierten Stromverbrauch. Diese Randbedingungen stellen sicher, dass in allen Szenarien der Strom- und Wärmebedarf zu jeder Zeit gedeckt werden kann. Darüber hinaus werden stundengenau die Lastflüsse für den notwendigen Stromtransport zwischen den Regionen in Brandenburg sowie den Nachbarregionen analysiert. Dadurch wird ein möglicher, systemrelevanter Bedarf an Leitungsausbau auf der Übertragungsebene und Speicherung erkennbar und kann in die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Szenarien mit einfließen. Im Schlusskapitel sowie insbesondere in einer separaten Dokumentation (s. S. 19) werden das Modell und die Annahmen detailliert beschrieben.

Berechnet werden drei Szenarien: In Szenario 1 (Energiestrategie 2030) werden nur die oben erwähnten Änderungen bei den Braunkohlekraftwerken berücksichtigt. In Szenario 2 werden auch hinsichtlich der Energieeinsparungen und des Exports aus Sicht der Autoren realistischere Annahmen getroffen. In Szenario 3 wird untersucht, wie die Energieversorgung Brandenburgs ohne Braunkohle gestaltet werden kann.

Alle drei Szenarien werden in engem Zusammenhang mit Berlin betrachtet. Für den Stromaustausch zwischen den Regionen und die umliegenden Bundesländer werden in Abbildung 1 die Übertragungsleistungen dargestellt.

¹ Die Abscheidung von CO₂ und dessen Einlagerung in unterirdische Lagerstätten

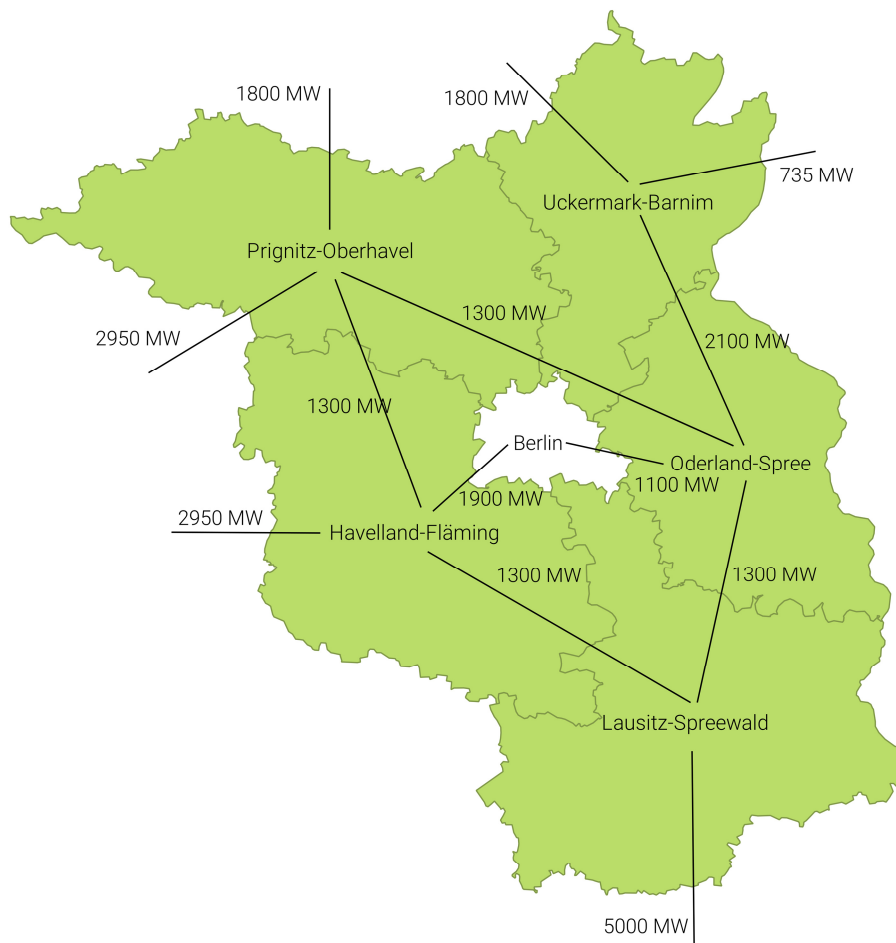


Abbildung 1: Regionen und Austauschleistungen

Szenario 1: Energiestrategie 2030

Im ersten Szenario wird ein Energiesystem simuliert, das weitestgehend² die Maßnahmen aus der Energiestrategie des Landes Brandenburg berücksichtigt. Das betrifft beispielsweise die Energieeinsparungen, den Zubau Erneuerbarer Energien in den Bereichen Strom und Wärme und die ursprünglich geplanten Zubauten von Gaskapazitäten. Als Nebenbedingungen werden das Ziel bezüglich der CO₂-Emissionen (maximal 25 Mio. t) und die Erwartungen an den Stromexport (42 TWh) vorgegeben.

Im Folgenden wird kurz auf einige Maßnahmen der Energiestrategie und auf deren Größenordnung eingegangen. Detaillierte Beschreibungen der Randbedingungen und Zahlenwerte sind in der Dokumentation zum Berechnungsmodell zu finden.

Erneuerbare Energien

Die Energiestrategie 2030 sieht im Bereich Erneuerbarer Energien insbesondere den Ausbau der Windkraft vor. Mit einer Leistung von 10,5 GW im Jahr 2030 gegenüber etwa 5,9 GW in

² Die Abweichungen aufgrund aktueller Entwicklungen betreffen die Abschaltung des Kraftwerks Jänschwalde ohne den Bau eines Nachfolgebraunkohlekraftwerks mit Einsatz von CCS.

2015 [AEE 2016] wird hier der größte Zubau vorgesehen. Photovoltaik soll dagegen nur auf 3,5 GW steigen. 2015 waren es 3,1 GW [AEE 2016]. Im Bereich Biomasse wird von keiner Steigerung ausgegangen, da die Potenziale als bereits ausgeschöpft angesehen werden (vgl. [MWE 2012, S. 24]).

Im Wärmebereich wird von einer erheblichen Steigerung der Wärmeversorgung durch Solarthermie und „sonstige regenerative Energieträger“ auf jeweils 2500 GWh ausgegangen. Das entspricht rund 5 % des gesamten Wärmebedarfs im Jahr 2013³. Aus Solarthermie wurden laut der Agentur für Erneuerbare Energien 2015 erst ca. 145 GWh Wärme bereitgestellt [AEE 2016]. Unter den sonstigen Energieträgern werden laut Auskunft des Ministeriums für Wirtschaft und Energie Geothermie, Wärmepumpen sowie die thermische Arbeit aus Klärgas- und Deponiegasanlagen zusammengefasst. In der Berechnung wird sich auf die Nutzung von Wärmepumpen beschränkt, da keine Daten zur Verteilung auf die verschiedenen Technologien zur Verfügung stehen.

Energieeinsparungen

Die Energiestrategie 2030 (ES 2030) sieht eine „überdurchschnittliche“ Senkung im Wärmeverbrauch von 34 % gegenüber 2007 vor [MWE 2012, S. 39]. Aber auch der Strombedarf soll um 9 % sinken. Insgesamt wird eine Senkung des Endenergieverbrauchs um 23 % angestrebt.

Diese massiven Energieeinsparungen erscheinen aus heutiger Sicht sehr ambitioniert. Abbildung 2 visualisiert Daten zur Zielerreichung im Bereich Energieeinsparung aus dem jüngsten Monitoringbericht zur Energiestrategie des Landes Brandenburg [MWE 2016].

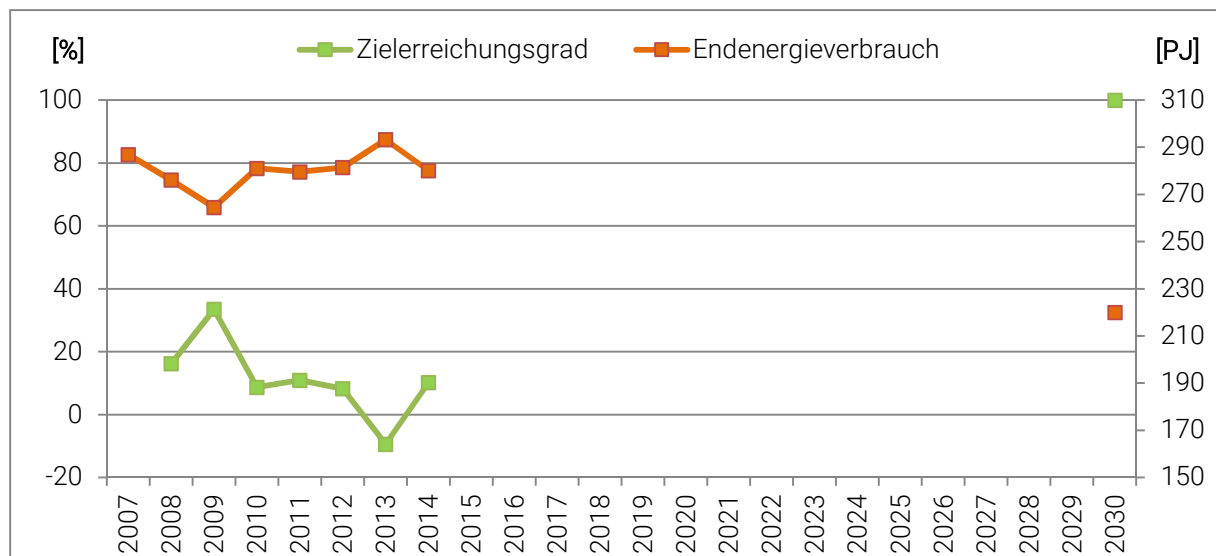


Abbildung 2: Senkung des Endenergieverbrauchs

Dargestellt sind der Endenergieverbrauch und der Zielerreichungsgrad jeweils von 2007 bis 2014 sowie als Zielwert in 2030. Demnach hat sich der Endenergieverbrauch seit 2007 mit Schwankungen in positive und negative Richtung kaum verändert. Eine klare Tendenz zu mehr Energieeinsparung lässt sich nicht ablesen. Diese wäre aber dringend notwendig, um das Ziel

³ Laut [MWE 2016, S. 23]: Raumwärme, Warmwasser und sonstige Prozesswärme: 168,2 PJ

bis 2030 zu erreichen. Da im ersten Szenario die Ziele aus der Energiestrategie übernommen werden, wird in diesem Szenario trotzdem von den hohen Einsparungen ausgegangen.

Export

Brandenburg sieht sich auch zukünftig als Stromexportland. Laut Energiestrategie soll der Export sogar auf 152 PJ (42 TWh) steigen [MWE 2012, S.39]. Laut Energiebilanz [AfS BB 2015] waren es im Jahr 2012 ca. 33 TWh. Das Erreichen einer hohen Exportmenge hängt vom Importbedarf der umliegenden Länder ab, der für 2030 seitens der Autoren als geringer eingeschätzt wird (vgl. S. 10). Dennoch wird im ersten Szenario der Stromexport entsprechend den Annahmen in der Energiestrategie in Höhe von 42 TWh („Gesamtstromexport“ [MWE 2012, S. 39]) als Bedingung für die Berechnung berücksichtigt. Gleichzeitig wird Stromimport aus den umliegenden Regionen zugelassen, der aber aufgrund der Kostenannahmen nur stattfindet, wenn die Deckung der Last aus eigenen Erzeugungsanlagen nicht möglich ist. So kann der bilanzielle Export (abzüglich der Importe) geringer ausfallen.

Elektromobilität

Laut ES 2030 soll der Anteil alternativer Kraftstoffe und Antriebe im Verkehrssektor auf 18 % steigen. 8 % sollen durch Bioenergie gedeckt werden. Des Weiteren geht die Energiestrategie von zunehmend strombasierter Bedarfsdeckung im Wärme- und Verkehrssektor aus [vgl. MWE 2012, S.39]. Deshalb werden 10 % der Verkehrsenergie in dem verwendeten Berechnungsmodell als Elektromobilität mit einem entsprechenden Stromlastgang abgebildet. Vereinfacht wird davon ausgegangen, dass sich die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor ebenfalls zunächst um 18 % mindern. Durch die Elektromobilität entstehen Emissionen, die dann dem Strombereich zugeordnet werden.

CO₂-Emissionen

Das wichtigste Ziel der Brandenburger Energiestrategie ist die Senkung der CO₂-Emissionen um 72 % gegenüber 1990 auf 25 Mio. t in 2030. Berücksichtigt werden in der Berechnung nur die CO₂-Emissionen, die durch die Verbrennung von Energieträgern in Brandenburg entstehen. Der Verkehrsbereich wird nicht in der Simulation abgebildet. Diesem werden in 2030 Emissionen in Höhe von 4,5 Mio. t CO₂ zugerechnet⁴. Für Strom und Wärme dürfen demnach maximal 20,5 Mio. t CO₂ anfallen. Gemäß Angaben des Ministeriums für Wirtschaft und Energie wird Biomasse als CO₂-neutral behandelt. Lediglich Biogas wird mit CO₂-Emissionen in Höhe von 0,015 t/MWh belastet. Wie auch in der Energiestrategie werden bei den Berechnungen die Emissionen für exportierten Strom Brandenburg zugeschrieben (vgl. [MWE 2012, S. 23]), für importierten Strom fallen dementsprechend keine Emissionen in Brandenburg an.

Kraftwerkspark

Der in der ES 2030 vorgesehene Ausbau der Kapazitäten der fluktuierenden Erneuerbaren Energien (FEE) Windkraft (10,5 GW) und Photovoltaik (3,5 GW) wird proportional zur Landesfläche auf die Planungsgemeinschaften aufgeteilt. Bei den konventionellen Erzeugungskapazitäten werden neben den bestehenden Kraftwerken⁵ für das erste Szenario zusätzliche Gaskapazitäten berücksichtigt, da laut den Daten zum Leitszenario 2030

⁴ Darin berücksichtigt sind Emissionseinsparungen durch alternative Antriebe.

⁵ gemäß Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur, Stand 2015; Abfall und sonstige Energieträger werden wie Öl behandelt

insgesamt 1500 MW Gaskraftwerke vorgesehen sind [LUGV 2012, Datenblatt 4]. Die zusätzlichen Gaskapazitäten werden für die Berechnung gleichmäßig auf die Regionen verteilt. Bei den Braunkohlekapazitäten wird die geplante Abschaltung der beiden 500 MW Blöcke sowie die erwartete Abschaltung der übrigen Blöcke in Jänschwalde bis 2030 für alle Szenarien berücksichtigt. In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind die beschriebenen Stromerzeugungskapazitäten in den Planungsgemeinschaften dargestellt. Die schraffierten Balken in Abbildung 4 bedeuten, dass diese Kapazitäten nicht in allen der drei untersuchten Szenarien zur Verfügung stehen. Das betrifft das Braunkohlekraftwerk Schwarze Pumpe mit 1500 MW, das im dritten Szenario (3) nicht berücksichtigt wird und den Zubau von 654 MW Gaskapazitäten auf insgesamt 1500 MW, der nur im ersten (Energiestrategie-)Szenario berücksichtigt wird. Die Gesamtkapazitäten thermischer Kraftwerke betragen in Szenario 1 4132 MW, in Szenario 2 3477 MW und in Szenario 3 1977 MW.

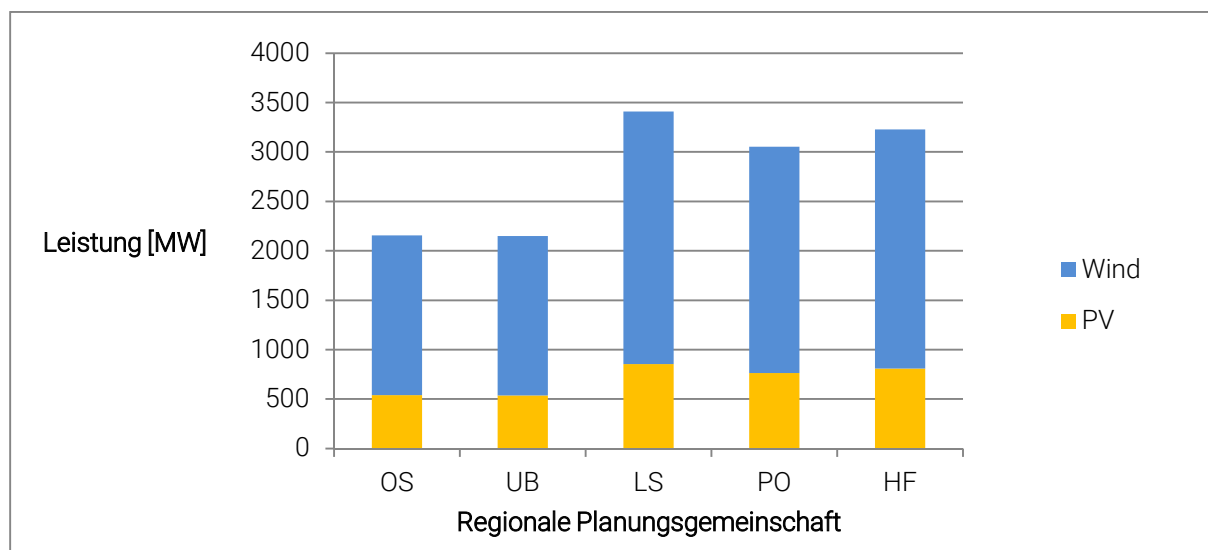


Abbildung 3: Kapazitäten der FEE im Jahr 2030

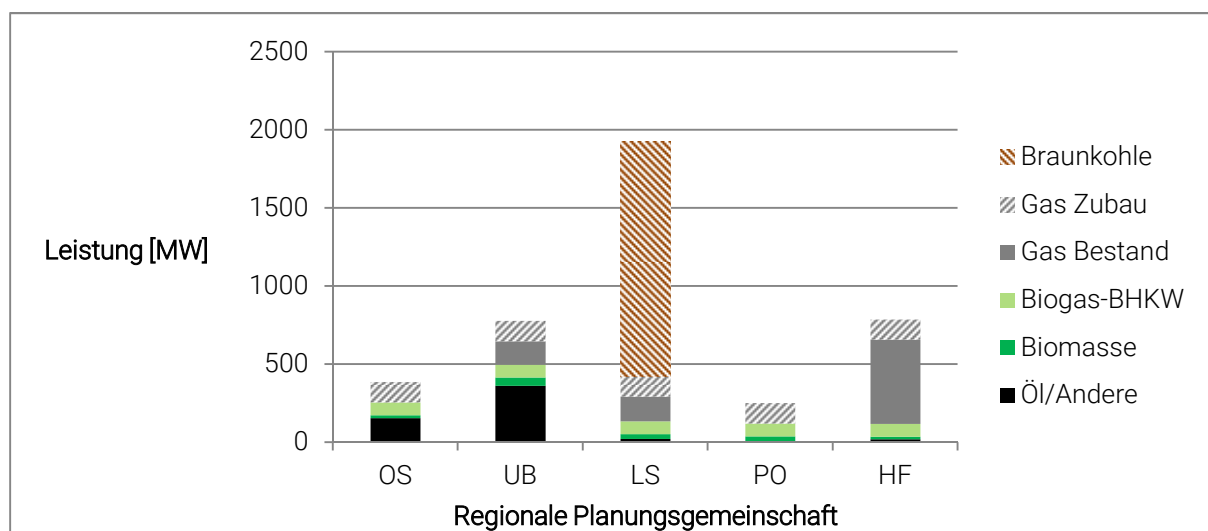


Abbildung 4: Kapazitäten der thermischen Kraftwerke im Jahr 2030

Gemäß der größeren Fläche fallen die FEE-Kapazitäten in Lausitz-Spreewald (LS), Prignitz-Oberhavel (PO) und Havelland-Fläming (HF) am größten aus. Bei den konventionellen

Kraftwerkskapazitäten finden sich in der Region Lausitz-Spreewald durch die Braunkohlekraftwerke die größten installierten Leistungen. In den anderen Regionen sind die Gesamtkapazitäten deutlich geringer.

Ergebnisse Szenario 1

Die Berechnung des Energiestrategie-Szenarios ergibt zunächst, dass die angestrebten CO₂-Minderungen im Energiebereich unter den getroffenen Annahmen erreichbar sind. Die Emissionsgrenze wird dabei voll ausgereizt. Um die Emissionsgrenzen einhalten zu können, darf das emissionsträchtige Braunkohlekraftwerk nicht voll zum Einsatz kommen (s. Abb. 5). Dies führt zu einem temporären Importbedarf von 731 GWh. Das entspricht nur 2 % des exportierten Stroms, zeigt aber, dass die Emissionsbedingung ohne mögliche Importe nicht eingehalten werden kann.

Die Braunkohlekapazitäten erscheinen in diesem Szenario überdimensioniert und ein Weiterbetrieb wirtschaftlich fragwürdig. Abbildung 5 zeigt mit welchen Technologien die Strom- und Wärmemengen in den Brandenburger Planungsgemeinschaften bereitgestellt werden. Außerdem ist für die konventionellen Kraftwerke die theoretisch maximal erreichbare Stromerzeugung bei 8760 Volllaststunden (Potenzial Strom) dargestellt, um die Auslastung der Kraftwerke besser einschätzen zu können. Für Windkraft und Photovoltaik wird kein theoretisches Maximum der Stromerzeugung dargestellt, da dieses immer vom Wetter abhängig ist.

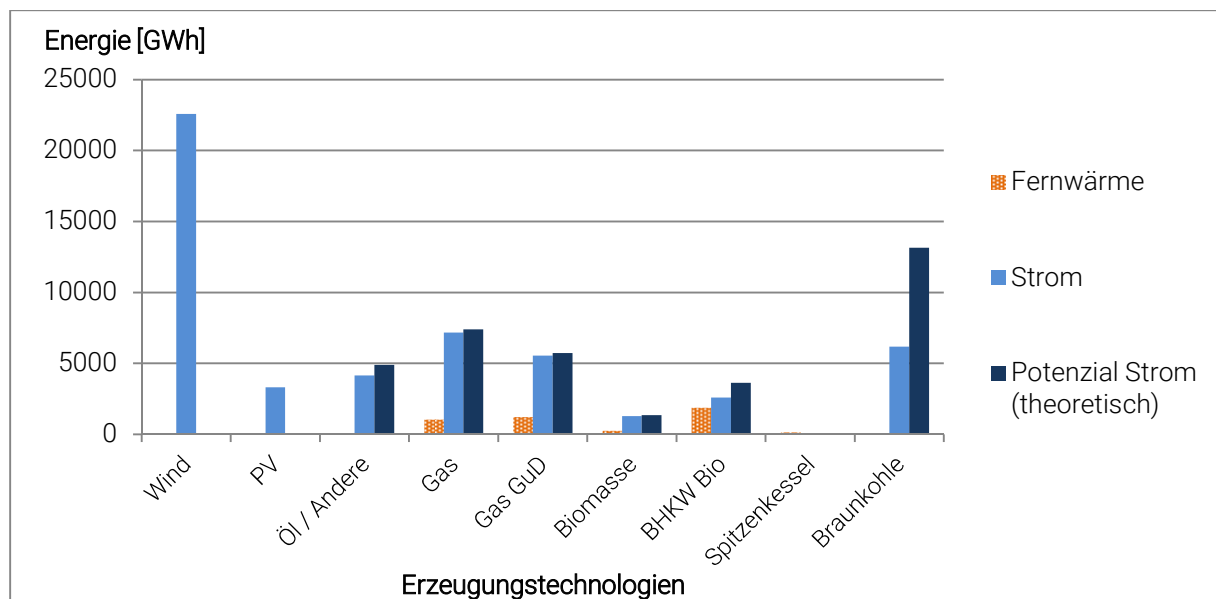


Abbildung 5: Potenzial und Auslastung der Strom- und Wärmeerzeugung Szenario 1

Es wird deutlich, dass die Braunkohlekapazitäten nicht ausgelastet werden können, wenn die CO₂-Einsparziele der Energiestrategie 2030 eingehalten werden sollen. Mit knapp 6200 GWh werden rund 47 % der potenziellen Energie benötigt. Das Kraftwerk Schwarze Pumpe würde demnach mit ca. 4100 Volllaststunden betrieben werden. Die anderen Kraftwerke wären dagegen aufgrund der geringeren CO₂-Emissionen deutlich besser ausgelastet.

In Abbildung 6 ist die Stromerzeugung in den einzelnen Planungsgemeinschaften sowie Berlin dargestellt. Die Stromerzeugung wird dabei unterschieden in die fluktuierenden Erneuerbaren Energien Windkraft und Photovoltaik (FEE), Biomasse und fossile Energieträger.

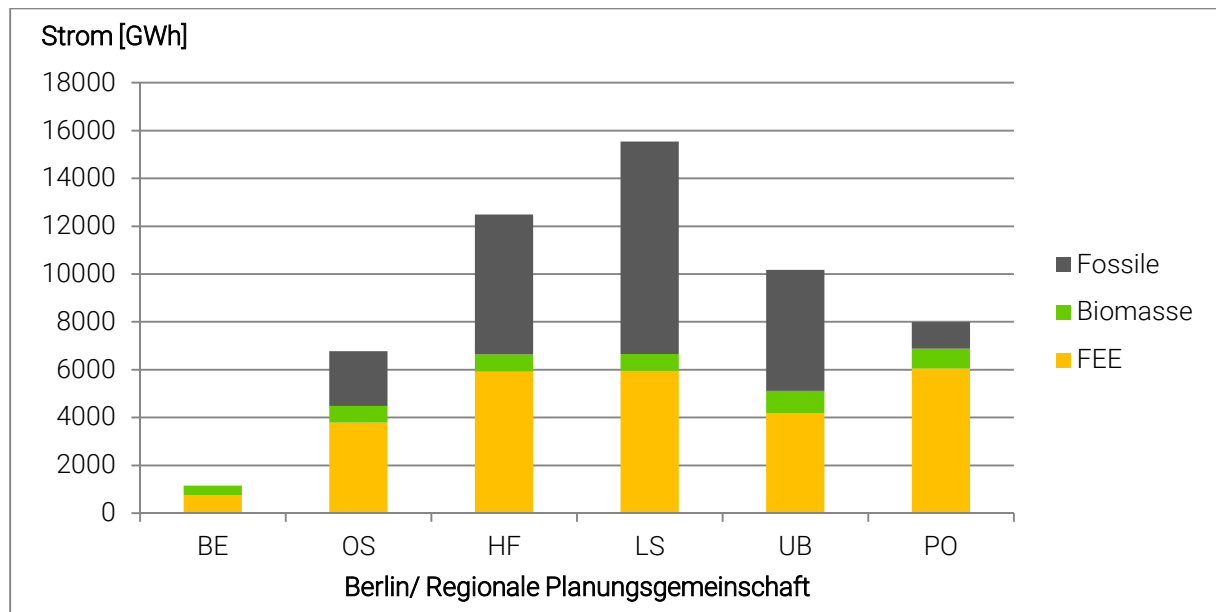


Abbildung 6: Stromerzeugung nach Regionen Szenario 1

Der meiste Strom wird demnach in der Region Lausitz-Spreewald erzeugt, wo durch das Braunkohlekraftwerk der billigste Strom erzeugt wird. Berlin erzeugt nur einen kleinen Teil seines Bedarfes selber und importiert den Rest aus Brandenburg.

Szenarien 2 und 3

Wie bereits erläutert wurde, werden die Annahmen zu Energieeinsparungen, Export und Kraftwerkskapazitäten aus der Energiestrategie 2030 als unrealistisch angesehen. Deshalb wird in einem zweiten Szenario mit veränderten Annahmen gerechnet.

In einer weiteren Variante (Szenario 3) wird außerdem ohne die Stromerzeugungskapazität des Braunkohlekraftwerks gerechnet.

Energieeinsparungen

Das Ziel der Energiestrategie, bis 2030 9 % des Endenergieverbrauchs im Strombereich und 34 % im Wärmebereich (23 % im gesamten Endenergieverbrauch) gegenüber 2007 einzusparen, scheint mit Blick auf aktuelle Daten nur sehr schwer erreichbar (vgl. S. 5 ff.).

Da Einsparmöglichkeiten bisher nicht ausreichend genutzt wurden und die Ziele der ES 2030 in der verbleibenden Zeit aus Sicht der Autoren nicht mehr erreicht werden, wird im zweiten und dritten Szenario von einem weniger starken Rückgang im Endenergieverbrauch ausgegangen: Im Wärmebereich wird angenommen, dass die Hälfte der Einsparungen, die in der Energiestrategie vorgesehen sind, bis 2030 erreicht werden können. Im Strombereich wird zwar von Einsparungen ausgegangen, die aber durch den zusätzlichen Strombedarf von Elektromobilität und Wärmepumpen ausgeglichen werden. Der Wärmebedarf steigt damit im

zweiten Szenario um 26 % gegenüber dem Basisszenario, der Strombedarf steigt um 6 %. Die Endenergieeinsparungen sinken damit insgesamt von 23 % auf 13 %.

Export

Die Energiestrategie prognostiziert, dass Brandenburgs Stromexport bis 2030 auf 152 PJ (42 TWh) steigt (vgl. S. 6). Das entspricht mehr Energie als der gesamte Strom- und Wärmebedarf Brandenburgs von in Summe 41,5 TWh (inklusive Elektromobilität) im Szenario 1 (ES 2030). Insbesondere unter der Annahme, dass auch die anderen Bundesländer in Zukunft durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien weniger Strom importieren müssen, scheinen die Erwartungen an den Importbedarf dieser Bundesländer in der Energiestrategie 2030 zu hoch. Eine Ausnahme bildet Berlin wegen seiner hohen Bevölkerungsdichte. Aufgrund der beschlossenen Abschaltung von Kohlekraftwerken und den relativ geringen Potenzialen für Erneuerbare Energien wird für die Szenarien 2 und 3 angenommen, dass Berlin langfristig die Hälfte seines Strombedarfs aus Brandenburg importieren wird. Dieser Import wird als Nebenbedingung für die Simulation eingeführt. Für die anderen Bundesländer wird davon ausgegangen, dass sich der Stromimportbedarf bis 2050 auf null verringert. Für 2030 wurde mittels Interpolation ein Prognosewert für den Stromexport errechnet⁶.

Abbildung 7 stellt die Endenergieverbräuche sowie die Exportanforderungen der drei Szenarien gegenüber.

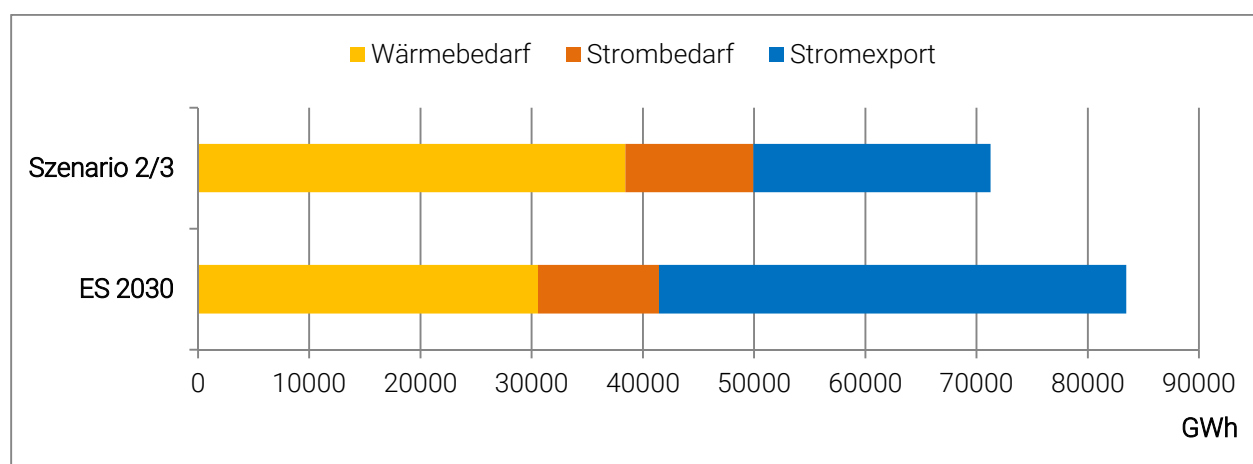


Abbildung 7: Szenarienvergleich: Energiebedarf und Stromexport

Es wird deutlich, dass im zweiten Szenario insgesamt etwa 15 % weniger Endenergie bereitgestellt werden muss als im Basisszenario. Im Strombereich sinkt die benötigte Erzeugung um knapp 40 %.

CO₂-Emissionen

Damit im zweiten Szenario der Energiemix nicht stärker CO₂-belastet ist als im ersten Szenario, wird die Obergrenze für Emissionen entsprechend des geringeren Gesamtenergiebedarfs verringert. Für den Strombereich inklusive der gekoppelten Wärmeerzeugung in KWK-Anlagen

⁶ Aus Energie-Bilanzen 2012 [Afs BB 2015] & [Afs BE 2015]: Lieferungen von Strom aus BB: 118998 TJ = 33055 GWh

Davon gingen 14246 TJ = 3957 GWh nach Berlin und in die übrigen Bundesländer 29098 GWh
Interpolation für 2030: 15315 GWh zzgl. 6016 GWh nach Berlin: 21331 GWh insgesamt

(Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen) wurde anhand der Ergebnisse des ersten Szenarios eine spezifische CO₂-Belastung pro kWh erzeugtem Strom in Höhe von 305,5 g/kWh berechnet. Entsprechend der Reduktion der Stromerzeugung um gut 20 TWh durch den verringerten Exportbedarf wird für das Simulationsmodell zunächst die Grenze für CO₂-Emissionen im Strombereich um 6,11 Mio. t reduziert. Der gegenüber Szenario 1 größere Bedarf im dezentralen Wärmebereich, der aus den geringeren Einsparungen in Szenario 2 und 3 resultiert, wird durch eine Erhöhung der Obergrenze für Emissionen ebenfalls berücksichtigt. Entsprechend der angenommenen Technologien und ihrer Wirkungsgrade erhöht sich die CO₂-Belastung um 1,18 Mio. t. Die Emissionen für Fernwärme aus Spitzenkesseln werden nicht umgerechnet, da die Fernwärme gekoppelt erzeugt werden kann.

Kraftwerkspark

Es wird davon ausgegangen, dass bis 2030 keine neuen Kraftwerke gebaut werden. Dementsprechend werden auch die Gaskapazitäten nicht wie im ersten Szenario auf 1500 MW vergrößert. Es werden nur die bereits bestehenden Kraftwerke berücksichtigt. In Szenario 3 wird dann außerdem ohne Braunkohlekapazitäten gerechnet.

Ergebnisse Szenarien 2 und 3

Die Berechnungen der Szenarien 2 und 3 führen zu deutlich geringeren Emissionen Brandenburgs. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen analog Abbildung 5, mit welchen Technologien die Strom- und Wärmemengen in Brandenburg in den Szenarien 2 und 3 bereitgestellt werden. Außerdem ist für die thermischen Kraftwerke die theoretisch maximal erreichbare Stromerzeugung bei 8760 Volllaststunden dargestellt, um die Auslastung der Kraftwerke besser einschätzen zu können. Diese potenziell möglichen Stromerzeugungen sind abhängig von den installierten Leistungen und deshalb mit Ausnahme von Braunkohle und Gas identisch mit denen im ersten Szenario.

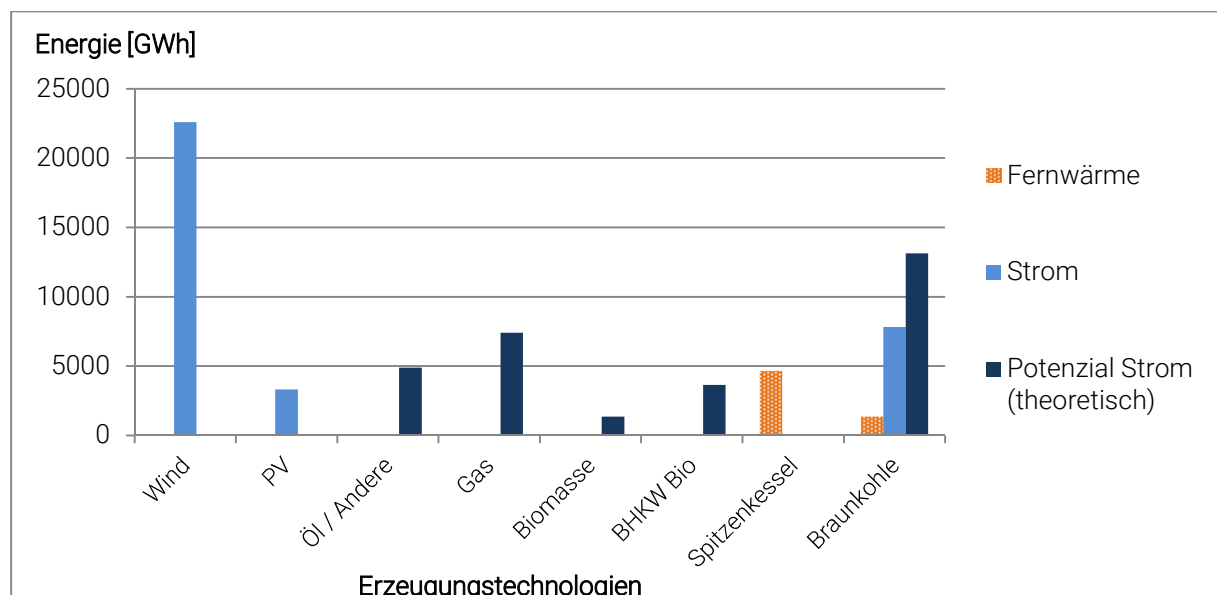


Abbildung 8: Potenzial und Auslastung der Strom- und Wärmeerzeugung Szenario 2

Für Szenario 2 wird deutlich, dass neben den FEE auf Grund des billigen Brennstoffs nur die Braunkohlekapazitäten in der Region Lausitz-Spreewald zur Stromerzeugung genutzt werden.

In den übrigen Regionen wird aufgrund des Imports von Braunkohlestrom die gesamte Fernwärme aus Spitzenlastkesseln gedeckt und nicht aus den eigenen KWK-Anlagen. Die Auslastung der Braunkohlekapazitäten ist dadurch etwas höher als im ersten Szenario. Da aufgrund der großen Erzeugung im Bereich der FEE eine äußerst unstete Residuallast entsteht, deren Deckung ein hohes Maß an Flexibilität fordert, wird dieses Szenario als wenig realistisch angesehen, insbesondere aufgrund der extrem niedrigen Teillast, unter der das große Braunkohlekraftwerk betrieben werden müsste. Teillastbedingte Wirkungsgradeinbußen werden zudem im Modell nicht abgebildet.

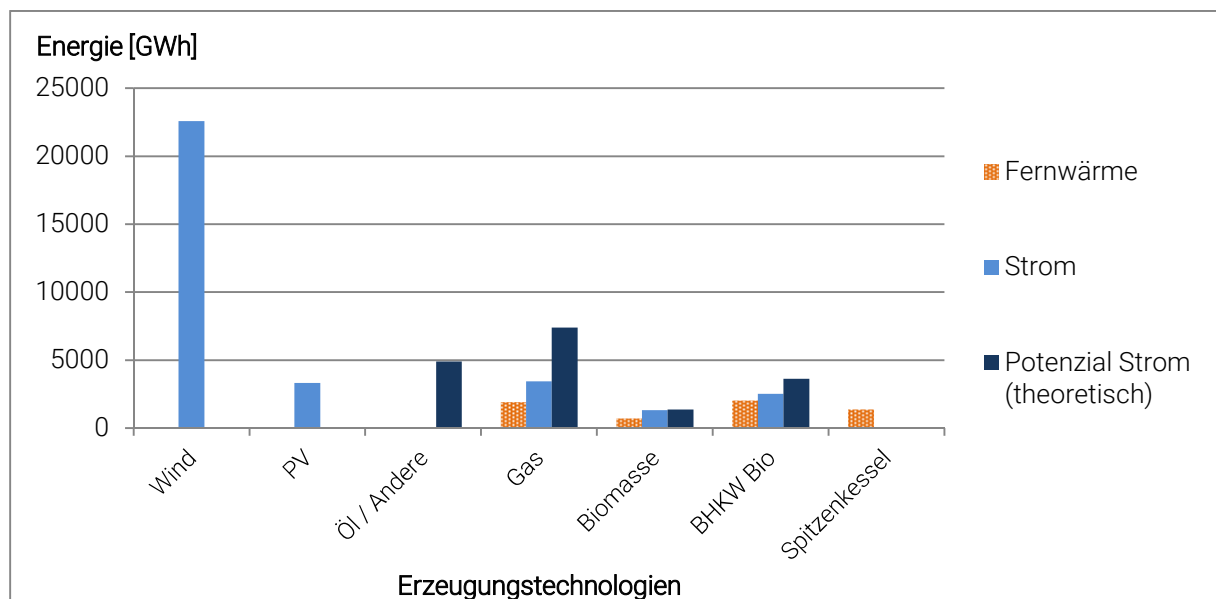


Abbildung 9: Potenzial und Auslastung der Strom- und Wärmeerzeugung Szenario 3

Im Szenario 3 dagegen werden die bestehenden Biomasse- und Gaskraftwerke besser ausgelastet. Dass selbst in diesem Szenario die Kapazitäten nicht voll ausgeschöpft werden, zeigt den großen Einfluss der Entwicklung im Stromexport, aber auch, dass ohne die Braunkohle eine ausreichende Versorgungssicherheit durch die bis 2030 geplanten Kapazitäten Erneuerbarer Energien in Kombination mit den heute bereits vorhandenen anderen Kraftwerken gewährleistet werden kann (s. Abb. 9).

Die regionale Verteilung der Stromerzeugung ist für beide Szenarien im Vergleich in Abbildung 10 dargestellt. Insbesondere im Bereich der konventionellen Kraftwerke ist die Verteilung in Szenario 3 ausgeglichener. Während in der Lausitz durch den Wegfall der Braunkohle weniger Strom erzeugt wird, steigt die Erzeugung in allen anderen Planungsgemeinschaften. Berlin erzeugt in beiden Szenarien gemäß der Vorgabe etwa die Hälfte seines Strombedarfes selbst. Aufgrund der geringen Potenziale im Bereich der Erneuerbaren Energien ist der Anteil fossiler Stromerzeugung in Berlin sehr hoch. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei einem zukünftig geringeren Stromexport und größeren Anteil Erneuerbarer Energien die vorhandenen konventionellen Kraftwerkskapazitäten mehr als ausreichend sind. Szenario 3 zeigt, dass auch ohne die großen Braunkohlekraftwerke die nötigen Energiemengen problemlos gedeckt werden können, wenn die FEE entsprechend den Zielen der Energiestrategie ausgebaut werden. Die beiden Szenarien zeigen unterschiedliche Nutzungsarten. Während in Szenario 2 fast der gesamte Strom in

einem Braunkohlekraftwerk erzeugt und in die Regionen verteilt wird, in denen die eigenen Kraftwerke nicht mehr genutzt werden, wird in Szenario 3 der Strom vor Ort in den vorhandenen Kraftwerken der Planungsgemeinschaften erzeugt.

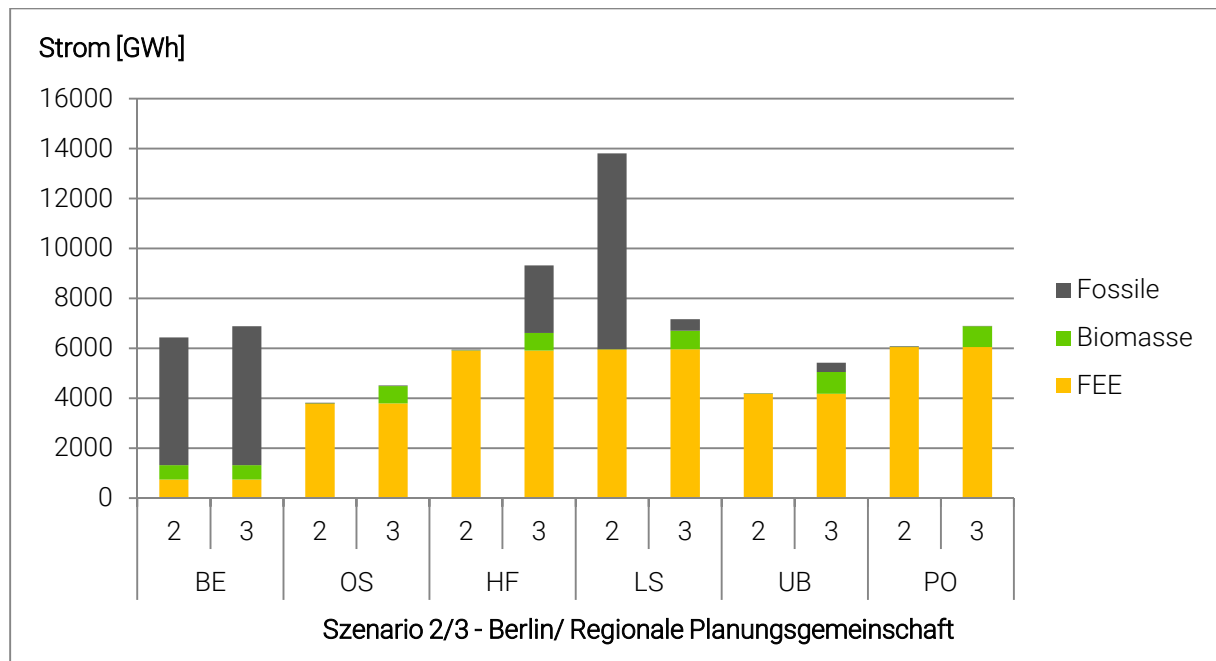


Abbildung 10: Stromerzeugung nach Regionen Szenario 2 und 3

Netze und Speicher

Die Analyse der unterschiedlichen Bedarfe an ggf. Netzausbau und Aufbau von Speicherkapazitäten wird anhand der Lastflüsse, Austauschsalen und der maximalen Austauschleistung zwischen den Gebieten sowie an den Koppelstellen zu den umliegenden Regionen (Mecklenburg-Vorpommern, Polen, Sachsen und Sachsen-Anhalt) durchgeführt. Betrachtet man die Lastflüsse zwischen den Regionen der Planungsgemeinschaften, so sind im Szenario 3 deutlich geringere Austauschleistungen als in den Szenarien 1 und 2 zu beobachten. Besonders ausgeprägt sind die Unterschiede der Leitungsauslastung bei der Übertragung aus der Region Lausitz-Spreewald. Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Jahresdauerlinien aller Szenarien für die Übertragungsleistung von Lausitz-Spreewald nach Oderland-Spree.

Die regional unausgeglichene Stromerzeugung im Szenario 2 führt zu der höchsten Leitungsbelastung, da der Strom zur Deckung der gesamten Residuallast Brandenburgs ausschließlich aus der Region Lausitz-Spreewald kommt. Die geringsten Leitungsbelastungen treten in Szenario 3 auf. Außerdem ist in diesem Szenario auch die Maximallast deutlich geringer als in den anderen Szenarien. Da sich mögliche Netzverstärkungen an der maximalen Auslastung orientieren, reduziert dieses Szenario auch das Risiko für zusätzliche Maßnahmen zur Netzverstärkung. Das ist auf die vergleichsweise dezentrale Erzeugung in Szenario 3 zurückzuführen.

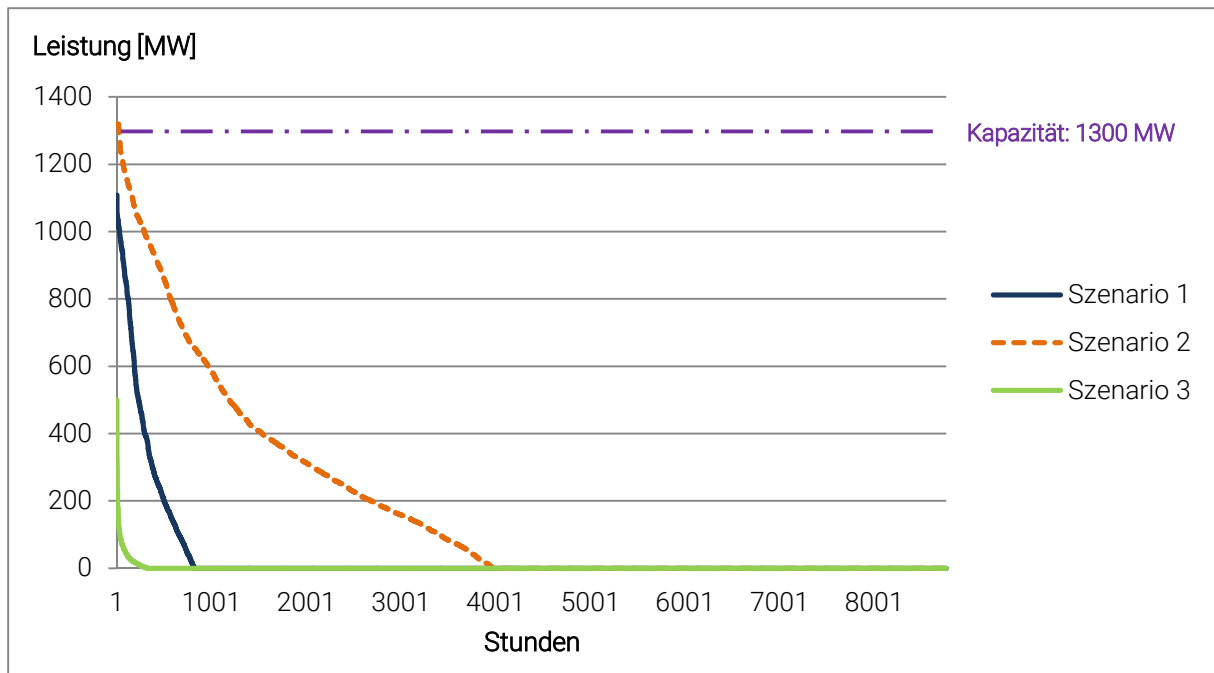


Abbildung 11: Jahresdauerlinien der Stromübertragung von LS nach OS

Auch bei den Lastflüssen in die umliegenden Exportregionen ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den Szenarien. Abbildung 12 zeigt die Auslastung der Exportkapazität von Lausitz-Spreewald nach Sachsen.

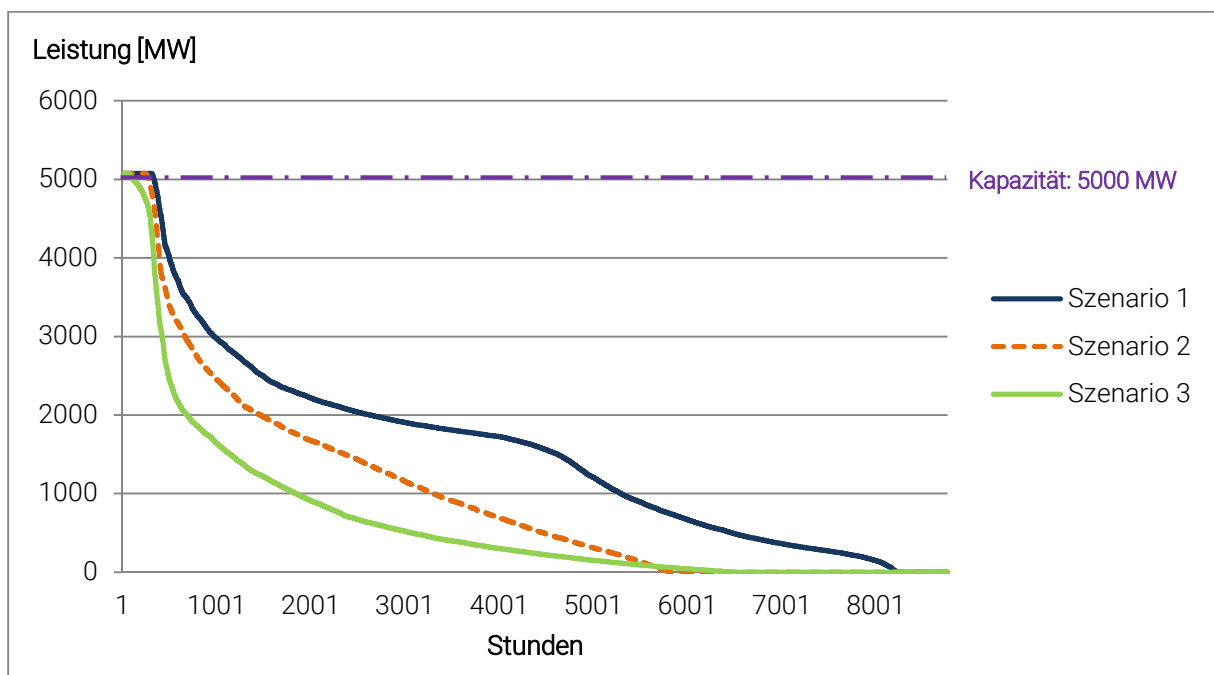


Abbildung 12: Jahresdauerlinien der Stromübertragung von LS nach SN

Auch hier ist die geringste Auslastung in Szenario 3 gegeben. In Szenario 1 (ES 2030) ist die Auslastung am größten, da in diesem Szenario insgesamt deutlich mehr Strom exportiert wird. Das gilt auch für die anderen Exportleitungen. Die Szenarien 2 und 3 unterscheiden sich

hauptsächlich dadurch, dass in Szenario 3 der Export gleichmäßiger auf die Regionen verteilt ist, während in Szenario 2 der meiste Strom aus der Lausitz exportiert wird.

Insgesamt ist die Netzbelastung in Szenario 3 am geringsten. Das führt auch zu den potenziell niedrigsten Netznutzungsgebühren, da keine weiteren Netzverstärkungen notwendig sind.

Der in allen Szenarien postulierte Ausbau der FEE und der Umbau der Versorgungsstruktur erfordern nach den Ergebnissen der Berechnungen basierend auf der Lastflussanalyse keine neuen Netzkapazitäten. Unter Umständen kommt es zu erforderlichen Maßnahmen zur Spannungshaltung und zur Bereitstellung von Kurzschlussleistung, was durch den beschriebenen Ansatz nicht abschließend geklärt werden konnte. Durch den Einsatz von Speichern könnten zusätzliche Optimierungspotenziale im Netzbetrieb erschlossen werden. Dies ergibt sich einerseits durch dezentrale Speicher beispielsweise bei privaten PV-Anlagen, die bereits heute aufgrund rasch sinkender Preise unmittelbar an der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit stehen. Hieraus ergibt sich eine geglättete und reduzierte Einspeisemenge und die Eigenbedarfsdeckung wird erhöht. Andererseits ergeben sich neue Optionen für zentrale Großspeicher an relevanten Netzknotenpunkten. Die ersten innovativen Anlagen dieser Art bewähren sich bereits im regulären Regelenergiemarkt, wo sie einen Beitrag zur Netzstabilität leisten. Konventionelle Kraftwerkskapazitäten mit rotierenden Massen werden hierdurch mehr und mehr verzichtbar.

Zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität bei einer Reduktion der Erzeugung durch konventionelle Kraftwerke mit Synchrongeneratoren werden in Zukunft auch weitergehende Aufgaben dieser Kraftwerke durch die FEE übernommen werden müssen. Dazu gehören neben den schon etablierten Anforderungen wie dem Beitrag zur Spannungs- und Frequenzhaltung auch weitergehende Aufgaben wie die Sicherstellung einer ausreichenden Kurzschlussleistung im Netz, der Beitrag zu einer Trägheit des Netzes, der Dämpfung von Spannungsänderungen im niederfrequenten (Flicker) und höherfrequenten Bereich (Oberschwingungen) oder der Unterstützung eines Netzwiederaufbaus nach großflächigen Störungen. Dies erfordert neue intelligente Betriebsstrategien z.B. von Windparks. Die notwendigen Anforderungen hierfür werden zur Zeit an der HTW Berlin z.B. im Forschungsprojekt „Windkraftwerk“⁷ entwickelt und erprobt. Diese neuen Betriebsstrategien basieren auf neu definierten Anforderungen, die FEE nicht mehr als Störgröße im elektrischen Verbundnetz sondern als Führungsgröße mit Aufgaben der Netzstabilisierung betrachten. Dies baut auf bestehenden Technologien auf und führt durch die steigenden Anforderungen und ggf. den Einsatz von erzeugungsseitigen Speichern eventuell zu geringen Mehrkosten auf Seiten der FEE, jedoch tendenziell zu einer Kostenentlastung auf der Netzseite.

CO₂-Emissionen

Die vorgegebenen Ziele der Verringerung von CO₂-Emissionen können in allen Szenarien eingehalten werden. Für die Braunkohlekraftwerke ergeben sich dadurch allerdings sehr geringe Auslastungen (vgl. S. 8 ff).

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen sowohl die spezifischen CO₂-Emissionen pro kWh Endenergie als auch die gesamten CO₂-Emissionen gegenüber dem Endenergieverbrauch für

⁷ <http://www.htw-berlin.de/forschung/online-forschungskatalog/projekte/projekt/?id=2232>

alle Szenarien sowie das Jahr 2014. Die spezifischen Emissionen in Gramm pro kWh sowie in Tonnen pro Kopf (Abbildung 13) werden dargestellt für Strom sowie für Strom und Wärme gemeinsam⁸. Sie beziehen sich jeweils auf den gesamten Endenergiebedarf inklusive des vorgegebenen Stromexports. Die absoluten energiebedingten CO₂-Emissionen (Abbildung 14) beinhalten abgesehen von der Elektromobilität keine Emissionen des Verkehrssektors (vgl. S. 6).

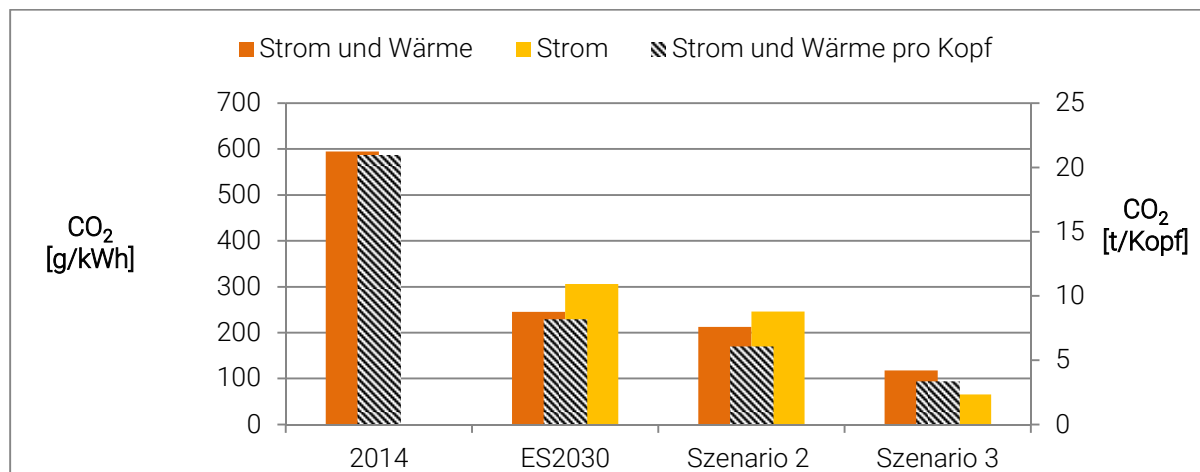


Abbildung 13: spezifische CO₂-Emissionen

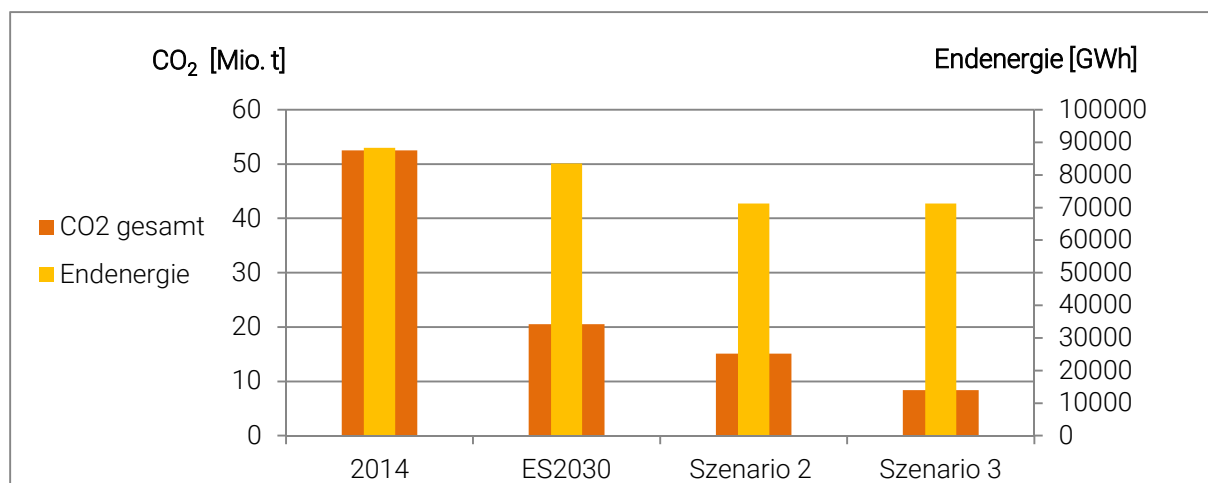


Abbildung 14: CO₂-Emissionen und Endenergie

Das Szenario ohne Braunkohle (3) weist mit Abstand die geringsten CO₂-Emissionen auf. Im Gegensatz zu den beiden anderen Szenarien sinken außerdem die spezifischen CO₂-Emissionen für die Stromerzeugung unter die der gesamten Strom- und Wärmeerzeugung in Brandenburg. Demnach sind die spezifischen Emissionen im Strombereich in diesem Szenario geringer als die im Wärmebereich. Laut Schätzungen einer Publikation des Umweltbundesamtes [UBA 2016] lag die CO₂-Belastung des deutschen Strommixes 2015 bei 535 g/kWh. Die deutlich geringeren Werte der vorliegenden Szenarien für 2030 gehen vor allem auf den Ausbau der Erneuerbaren Energien zurück. Die Anteile der FEE⁹ an der Deckung des

⁸ Gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung aus KWK-Anlagen wird dem Sektor Strom zugeordnet.

⁹ Die sich durch die zeitaufgelöste Berechnung ergebenden Anteile ohne Überschüsse

Strombedarfs liegen in den Regionalen Planungsgemeinschaften in allen Szenarien zwischen 77 % und 86 %. Die bilanziellen Anteile fallen deutlich höher aus.

Gegenüber 1990 werden in Szenario 3 mit insgesamt 12,7 Mio. t (inkl. Verkehr) 85,7 % weniger energiebedingte CO₂-Emissionen ausgestoßen. Die Werte spiegeln die reinen durch Rohstoffverbrennung verursachten Emissionen wider und sind daher als Minimum zu verstehen. Diese Art der Bilanzierung wurde gewählt, da auch in der Energiestrategie und in anderen Emissionsbetrachtungen wie [UBA 2016] keine Vorketten berücksichtigt werden.

Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

In der vorliegenden Studie wurde die Energiestrategie 2030 des Landes Brandenburg aus aktueller Perspektive untersucht. Daher sind das Kraftwerk Jänschwalde und die CCS-Technologie nicht in die Berechnungen eingeflossen. Zwei Punkte der Energiestrategie werden darüber hinaus als unrealistisch erachtet: die Höhe des Stromexports und die Höhe der Energieeinsparungen. Mit veränderten Annahmen zu diesen beiden Punkten wurden deshalb zwei Alternativ-Szenarien berechnet. Eines der beiden Szenarien verzichtet 2030 ganz auf Braunkohlekapazitäten und schafft damit eine verbrauchernahe Stromerzeugung in den Regionen mit geringeren Netzbelastungen und einer deutlich besseren CO₂-Bilanz.

Im Folgenden wird kurz auf die wichtigsten Punkte eingegangen.

Konventionelle Kraftwerke

Die Auslastung der Braunkohlekapazitäten liegt im Energiestrategieszenario bei rund 47 %. Schwarze Pumpe dürfte mit maximal 4121 Volllaststunden betrieben werden.

Wenn der Export nicht wie in der Energiestrategie prognostiziert ansteigt, sondern langfristig sinkt, wird die Braunkohle überflüssig. Zur Deckung der Residuallast sind die vorhandenen Gaskapazitäten und anderen Kraftwerke aus verschiedenen Gründen besser geeignet:

- Sie können flexibler auf die fluktuierende Residuallast reagieren.
- Gaskraftwerke sind langfristig auch mit erneuerbarem Methan betreibbar.
- Die CO₂-Emissionen sind deutlich geringer.
- Die Netze werden aufgrund der dezentralen Verteilung der Kraftwerke weniger belastet.

Senkung des Energieverbrauchs

Die Landesregierung hat sich mit der Energiestrategie ambitionierte Ziele im Bereich Energieeinsparungen gesetzt, die nicht mehr realisierbar sind. Deshalb wurden die Alternativszenarien mit geringeren Einsparungen berechnet. Doch auch um diese Ziele zu erreichen, werden Maßnahmen benötigt, die die Umsetzung von Einsparmaßnahmen unterstützen und beschleunigen. Denkbar sind beispielsweise finanzielle Anreize für Investitionen in Energieeffizienz. Aber auch der öffentliche Diskurs und die öffentliche Vorbildfunktion sollten nicht unterschätzt werden. Insbesondere im Wärmebereich sei an dieser Stelle auf die Handlungsempfehlungen aus dem Jahr 2012 in [RLI 2012 K] verwiesen, die heute noch hochaktuell sind.

Technologien

Die Energiestrategie 2030 geht von einer stark zunehmenden Nutzung moderner Technologien wie Wärmepumpen und Solarthermie im Heizungsbereich sowie von zunehmender Sektorenkopplung beispielsweise durch Elektromobilität aus. Diese Annahmen wurden auch für die Alternativszenarien nicht verändert. Die starke Zunahme umweltfreundlicher Technologien wird aber nicht von alleine geschehen. Um am Ende eine nachhaltige Energieversorgung in allen Bereichen zu erlangen, müssen neue Technologien, insbesondere im Wärmebereich, stärker gefördert werden. Durch die Abschaltung der Braunkohlekraftwerke könnten die Emissionen im Strombereich vergleichbar einfach erheblich gesenkt werden. Im Wärmebereich müssen unzählige Anlagen ausgetauscht und erneuert werden, was deutlich mehr Engagement und Anreize fordert.

Ausbau Erneuerbarer Energien

Die in der Energiestrategie gesetzten Ziele für den Ausbau Erneuerbarer Energien führen zu einem FEE-Anteil von ca. 80 % am Stromverbrauch. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen insbesondere der Ausbau der Windkraft weiter unterstützt und Vorrangflächen ausgewiesen werden. Um bis 2030 10,5 GW Windkraft zu erreichen, muss die installierte Leistung pro Jahr um ca. 300 MW steigen. Das bedeutet, der Ausbau muss in ähnlichem Maße wie bisher fortgesetzt werden und sollte nicht verlangsamt werden.

Die Ausbauziele im Bereich Photovoltaik sind außerdem zu überdenken. Da heute schon über 3 GW Photovoltaik in Brandenburg installiert sind, ist davon auszugehen, dass das Ziel der Energiestrategie von 3,5 GW in 2030 deutlich übertroffen werden kann. Ein ambitionierterer Ausbau von PV könnte sich zudem positiv auf die Residuallast auswirken, da die Erzeugung von Wind- und PV-Strom oft zeitversetzt auftritt und sich so gut ergänzt (vgl. [Gerlach 2011]).

Weiterführende Informationen zum Modell und den verwendeten Daten

Die vorliegende Studie enthält für eine bessere Lesbarkeit nur wenige Informationen zu der Modellierung des Energiesystems und den Eingangsdaten. Um trotzdem die nötige Transparenz der Annahmen und Berechnungen gewährleisten zu können, wird eine separate Dokumentation zur Verfügung gestellt und der Berechnungscode offen gelegt.

Die Simulationen dieser Studie basieren auf dem Open-Source Framework „oemof“¹⁰ zur Energiesystemmodellierung. Dieses ermöglicht es, verschiedenste Energiesysteme mit den gleichen Bausteinen abzubilden. Durch die Offenlegung des Codes und die damit einhergehende Transparenz von Berechnungen wird eine stetige Verbesserung des Frameworks auch durch externe Experten ermöglicht.

Das Berechnungsmodell bilanziert auf Ebene der regionalen Planungsgemeinschaften Brandenburgs zuzüglich Berlin. Der Einsatz der Kraftwerke wird auf minimale Kosten optimiert. Die verwendete App und eine ausführliche Beschreibung des Modells für die vorliegende Untersuchung findet sich auf <https://github.com/rl-institut/appBBB>. Factsheets in englischer Sprache zu dem Modell und den Szenarien sind außerdem auf der OpenEnergy Plattform unter folgenden Links zu finden.

- <http://oep.iks.cs.ovgu.de/factsheets/frameworks/5/> (framework)
- <http://oep.iks.cs.ovgu.de/factsheets/models/32/> (model) und
- <http://oep.iks.cs.ovgu.de/factsheets/scenarios/4/>
- <http://oep.iks.cs.ovgu.de/factsheets/scenarios/3/> (scenarios)

Die Eingangsdaten sind in der OpenEnergy Datenbank¹¹ einsehbar.

¹⁰ <http://wiki.openmod-initiative.org/wiki/Oemof>

¹¹ <http://193.175.187.164/dataedit/view/scenario> (Schema scenario: alle Tabellen mit „abbb“ im Namen)

Quellen

- [AEE 2016]: www.foederal-erneuerbar.de
- [AfS BB 2015]: Amt für Statistik Berlin-Brandenburg: Statistischer Bericht E IV 4 – j / 12; Energie- und CO₂-Bilanz im Land Brandenburg 2012; 2015
- [AfS BE 2015]: Amt für Statistik Berlin-Brandenburg: Statistischer Bericht E IV 4 – j / 12; Energie- und CO₂-Bilanz in Berlin 2012; 2015
- [Gerlach 2011]: Gerlach A., Stetter D., Schmid J., und Breyer C.: PV and Wind Power - Complementary Technologies; Proc.; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference; Hamburg; 2011
- [Grüne 2016]: BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Beschluss (vorläufig) Energiewende retten, Verkehrswende einleiten; 40. Ordentliche Bundesdelegiertenkonferenz; November 2016
- [LUGV 2012]: Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Ministerium für Wirtschaft und Europaangelegenheiten; Ableitung der Ziele für ein Leitszenario 2030 unter Berücksichtigung dynamischer Analysen; Februar 2012
(http://www.energie.brandenburg.de/media/bb1.a.2865.de/Zahlen_Zielszenario.pdf)
- [MWE 2012]: Ministerium für Wirtschaft und Europaangelegenheiten des Landes Brandenburg: Energiestrategie 2030 des Landes Brandenburg; Februar 2012
- [MWE 2016]: Ministerium für Wirtschaft und Energie des Landes Brandenburg: 6. Monitoringbericht zur Energiestrategie des Landes Brandenburg; Berichtsjahr 2014; März 2016
- [RLI 2012 K]: Twele, Müller, Möller et.al.: Kurzinformation Szenarioberechnung einer Strom- und Wärmeversorgung der Region Brandenburg-Berlin auf Basis Erneuerbarer Energien; 2012
- [UBA2016]: Umweltbundesamt; Climate Change 26/2016 Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015; ISSN 1862-4359; Juni 2016