

Sektorenggekoppelte Energiesysteme zur Integration erneuerbarer Energien

Jens Hinrich Prause, Raphael Wittenburg, Dr. Moritz Hübel, Dr. Jürgen Nocke,
Prof. Dr. Egon Hassel

Universität Rostock, Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock, Deutschland,
Telefon: 0049 381 4989500, jens.prause@uni-rostock.de, www.ltt.uni-rostock.de

Kurzfassung: Mit der Energiewende wurde das Ende der fossil-nuklearen Stromerzeugung eingeläutet. Im Fokus steht dabei die Dekarbonisierung der Energieversorgung. Es wurde bereits gezeigt, dass Energieeinsparungen auf der Verbrauchsseite, Effizienzsteigerungen bei den Energiewandlungsprozessen und hohe Anteile erneuerbarer Energien bei der Erzeugung notwendig sind, um die definierten Ziele zur Senkung des Kohlendioxidausstoßes zu erreichen. Allerdings ist weiterhin unklar, welche Kombination von Technologien genutzt werden soll und wie das zukünftige Energieversorgungssystem aufgebaut sein soll.

Mit dem fortschreitenden Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien Windenergie und Photovoltaik wird der Bedarf an Ausgleichsmöglichkeiten zwischen Angebot und Nachfrage weiter steigen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn erneuerbar erzeugter Strom zunehmend zur Deckung des Bedarfs in allen drei Sektoren der Energiewirtschaft – den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität – eingesetzt werden soll.

Da es eine Vielzahl an Möglichkeiten gibt die Energiewende technologisch umzusetzen, ist es notwendig mögliche Entwicklungspfade durch das Erstellen von Szenarien aufzuzeigen, in denen realistische Randbedingungen sowie gesellschaftliche und politischer Zielstellungen berücksichtigt werden. Die Entwicklung und Analyse von Modellen künftiger Energiesysteme, die auf den Szenarien basieren, ermöglicht eine umfassende Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Optionen.

Mithilfe eines Energieflussmodells werden die Potenziale eines bestehenden Referenzsystems hinsichtlich der Eignung von Sektorenkopplungstechnologien zur Integration erneuerbarer Energien untersucht. Dazu werden für das Energiesystem der Hansestadt Rostock Randbedingungen für die erzeuger- und verbraucherseitigen Energieströme in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität ermittelt. Auf dieser Grundlage wird ein Energieflussmodell des Referenzsystems erstellt, parametrisiert und einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Ausgehend vom Ist-Zustand des Systems, den gesetzten Klimaschutzziele, Ausbaupfaden der Erneuerbaren und Annahmen zur Entwicklung der Energiebedarfe werden zwei Zukunftsszenarien entwickelt und modelliert. Abschließend erfolgt die Gegenüberstellung und Bewertung der Szenarien bezüglich der Erreichung der Klimaschutzziele und der Auswirkung der Sektorenkopplung auf das Stromsystem.

Keywords: Sektorenkopplung, Netzstabilität, Kraft-Wärme-Kopplung, Power-to-Heat, Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Elektromobilität, EnergyPLAN

1 Einleitung

Mit der Energiewende wurde das Ende der fossil-nuklearen Stromerzeugung eingeläutet. Im Fokus steht dabei die Dekarbonisierung der Energieversorgung, mit der die maßgeblich vom Menschen verursachte globale Erwärmung begrenzt werden soll. Es wurde bereits gezeigt, dass Energieeinsparungen auf der Verbrauchsseite, Effizienzsteigerungen bei den Energiewandlungsprozessen und hohe Anteile erneuerbarer Energien bei der Erzeugung notwendig sind, um die definierten Ziele zur Senkung des Kohlendioxidausstoßes zu erreichen [1]. Allerdings ist weiterhin unklar, welche Kombination von Technologien genutzt werden soll und wie das zukünftige Energieversorgungssystem aufgebaut sein soll [2].

In den vergangenen Jahren haben die Bereiche Windenergie und Photovoltaik eine starke Kostenreduktion erfahren, womit sie zu den Schlüsseltechnologien der Energiewende geworden sind [3]. Beide tragen zunehmend zur elektrischen Energieversorgung in Deutschland und Europa bei [4]. Dagegen sind andere erneuerbare Energien, wie Biomasse und Wasserkraft, deutlich teurer oder haben nur begrenztes Ausbaupotential. Dies führte zu einem starken Ausbau von Windenergie und Photovoltaik, der weiter andauert [5]. Die beiden Technologien zählen zu den fluktuierenden erneuerbaren Energien, die nicht oder nur in sehr geringem Maße regelbar sind und deren Dargebot schwankt. Mit ihrem fortschreitenden Ausbau wird der Bedarf an Ausgleichsmöglichkeiten zwischen Angebot und Nachfrage weiter steigen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn erneuerbar erzeugter Strom zunehmend zur Deckung des Bedarfs in allen drei Sektoren der Energiewirtschaft – den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität – eingesetzt werden soll. Die Elektrifizierung und die Herstellung synthetischer Kraftstoffe werden als die aussichtsreichsten Möglichkeiten betrachtet, den Anteil erneuerbarer Energien im Wärme- und Mobilitätssektor zu erhöhen [6].

Grundsätzlich ist anzunehmen, dass es vielfältige Möglichkeiten gibt, die technologische Realisierung der Energiewende umzusetzen. Für die konkrete Ausgestaltung eines zu großen Teilen auf Erneuerbaren basierenden Energiesystems ist es daher notwendig, mögliche Entwicklungspfade durch die Erstellung von Szenarien aufzuzeigen. Indem potenzielle zukünftige Entwicklungen des Systems unter Berücksichtigung realistischer Randbedingungen entworfen werden, kann ermittelt werden, wie bestimmte gesellschaftlich oder politisch festgelegte Ziele erreicht werden können und welche Maßnahmen hierzu ergriffen werden müssen. Dazu können Modelle künftiger Energiesysteme, die auf den Szenarien basieren, entwickelt und analysiert werden [7].

Ziel ist es, mithilfe eines Energieflussmodells die Potenziale eines bestehenden Referenzsystems hinsichtlich der Eignung von Sektorenkopplungstechnologien zur Integration erneuerbarer Energien zu untersuchen. Im Fokus steht dabei die Entwicklung von Zukunftsszenarien für das Energiesystem der Hansestadt Rostock, das als Referenzsystem dient. Dazu werden für das Rostocker Energiesystem Randbedingungen für die erzeuger- und verbraucherseitigen Energieströme in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität ermittelt. Auf dieser Grundlage wird ein Energieflussmodell des Referenzsystems erstellt, parametrisiert und einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Ausgehend vom Istzustand des Systems, den gesetzten Klimaschutzziele, Ausbaupfaden der Erneuerbaren und Annahmen zur Entwicklung der Energiebedarfe werden zwei Zukunftsszenarien entwickelt und modelliert. Abschließend erfolgt die Gegenüberstellung und Bewertung der Szenarien bezüglich der

Erreichung der Klimaschutzziele und der Auswirkung der Sektorenkopplung auf das Stromsystem.

2 Sektorenkopplungstechnologien

Ein Einsatzgebiet der Sektorenkopplung ist die Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen für das Stromsystem durch Nutzung von Überschüssen, zum Beispiel mit Power-to-Heat- oder Power-to-Gas-Anlagen, und Deckung von Defiziten mit dem stromgeführten Einsatz von KWK-Anlagen oder der Rückverstromung synthetischer Brennstoffe. Sektorenkopplungstechnologien ermöglichen ähnlich wie Energiespeicher einen zeitlichen Ausgleich von Angebot und Nachfrage. Zudem ist auch ein räumlicher Ausgleich wichtig, der durch das Stromnetz bereitgestellt werden kann und mit dem sich der Speicherbedarf verringern lässt. Die durch das fluktuierende Dargebot von Solar- und Windenergie bestehenden Herausforderungen für das Stromsystem könnten durch die Kopplung der drei Energiesektoren wesentlich verringert werden [8].

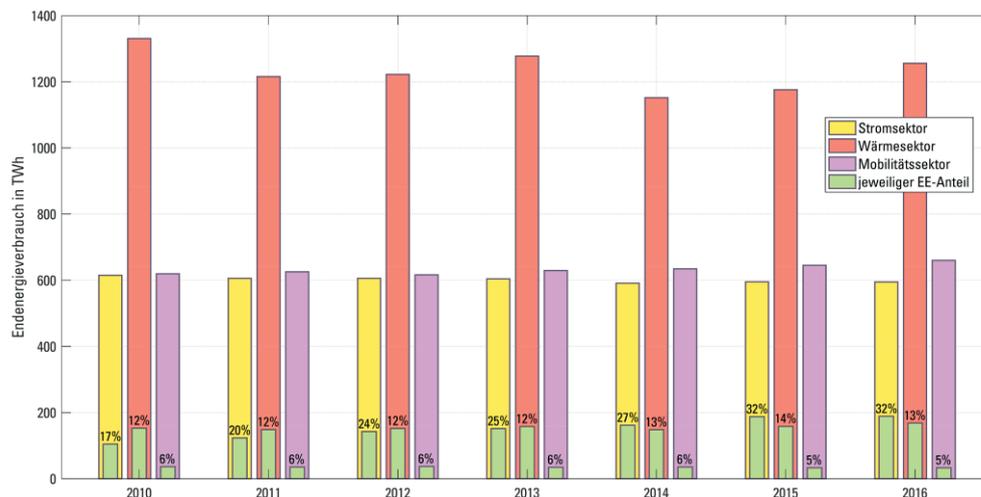


Abbildung 1: Endenergieverbrauch in den einzelnen Sektoren in Deutschland in TWh

Abbildung 1 zeigt den erneuerbaren Anteil an den 3 Sektoren Strom, Wärme und Mobilität. Ein weiteres bedeutendes Ziel der Sektorenkopplung liegt in eben jener Steigerung. Durch die dadurch entstehenden zusätzlichen Verbraucher entwickeln sich jedoch auch zusätzliche Inflexibilitäten. Für die umfangreiche Nutzung erneuerbarer Energien in allen Sektoren müssen zusätzliche Erzeugungskapazitäten in erheblichem Maße aufgebaut werden [9]. Wichtige Sektorenkopplungstechnologien, die zum Teil auch kombiniert betrieben werden können, sind:

- Kraft-Wärme-Kopplung: KWK-Anlagen erzeugen elektrische und thermische Energie stets gleichzeitig, wodurch sich verschiedene Betriebsmodi ergeben, abhängig von dem Bedarf der gedeckt werden soll. Zur Integration erneuerbarer Energien in das Stromsystem bietet sich der stromgeführte Betrieb an. Die KWK-Anlage wird dabei zur Deckung der Residuallast eingesetzt und die als Koppelprodukt erzeugte Wärme wird zum Beispiel in ein Fernwärmenetz

eingespeist. Ist während des Betriebs der Anlage kein Wärmebedarf vorhanden, ist es zweckmäßig mit der produzierten Wärme einen thermischen Speicher zu beladen.

- **Power-to-Heat:** Mit Power-to-Heat wird die Erzeugung von Wärme aus elektrischem Strom bezeichnet. Allerdings beschränkt sich der Begriff Power-to-Heat im Allgemeinen auf die Wärmeerzeugung unter Verwendung erneuerbaren Stroms, der mangels anderer Nutzungsmöglichkeiten abgeregelt werden müsste. Eine Power-to-Heat-Anlage eignet sich somit als Überschussstromverbraucher für die Erzeugung von Raumwärme und für die Warmwasserbereitung.
- **Power-to-Gas:** Mit Power-to-Gas wird eine Technologie bezeichnet, bei der elektrischer Strom in einen gasförmigen Energieträger konvertiert wird. Der hergestellte Energieträger ist in der Regel Wasserstoff, der durch eine Elektrolyse aus Wasser und Strom hergestellt wird. In einem nachgeschalteten Prozess kann durch die Methanisierung des Wasserstoffs mittels Kohlendioxid Methan synthetisiert werden, das dann auch als SNG (Synthetic Natural Gas) bezeichnet wird [6].
- **Power-to-Liquid:** Die Power-to-Liquid-Technologie wird verwendet, um flüssige, synthetische Kraftstoffe herzustellen. Als Ausgangsstoff dienen Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid. Die Power-to-Liquid- und die Power-to-Gas-Technologie sind stark miteinander verknüpft, da der Erzeugung synthetischer Kraftstoffe stets die Herstellung von Wasserstoff mittels einer Elektrolyse, wie beim Power-to-Gas-Verfahren, vorausgeht. Statt eine Methanisierung des Wasserstoffs vorzunehmen, werden mittels einer Fischer-Tropsch-Synthese flüssige Kohlenwasserstoff synthetisiert [19].
- **Elektromobilität:** Die direkte Kopplung des Strom- und Verkehrssektors durch Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge bietet Flexibilitätsoptionen für das Stromsystem. Ein intelligent gesteuertes Lademanagement für Elektrofahrzeuge kann dazu beitragen, die intermittierende, volatile Einspeisung erneuerbarer Energien auszugleichen, indem Fahrzeugbatterien vornehmlich in Zeiten mit Stromüberschuss geladen werden. Diese Technologie wird als Smart-Charge oder Smart-Load bezeichnet und kann die Netzintegration fluktuierender Strommengen fördern.

3 Modellbildung

Bei dem betrachteten System handelt es sich um das Energieversorgungssystem der Hansestadt Rostock. Auf Basis vorhandener Daten werden unterschiedliche Modellannahmen getroffen. Es werden stromseitig alle Erzeuger und Verbraucher betrachtet, die elektrische Energie aus dem Versorgungsnetz der Stadtwerke Rostock Netzgesellschaft beziehen bzw. in dieses einspeisen. Im Bereich des Wärmesektors werden sowohl die individuelle Wärmeversorgung als auch die Fernwärmeversorgung berücksichtigt. Im Verkehrssektor wird der Straßenverkehr auf Basis der in Rostock gemeldeten Fahrzeuge betrachtet. Ausgehend von einem Referenzszenario, das das derzeitige Energiesystem abbildet, werden Szenarien entworfen, in denen mögliche zukünftige Entwicklungen des Energiesystems betrachtet werden.

Die Energieversorgung der Hansestadt erfolgt zum größten Teil leitungsgebunden, wobei die Versorgungsnetze für Strom und Erdgas das gesamte Stadtgebiet abdecken. Das Fernwärme- sowie Erdgasnetz betreibt die Stadtwerke Rostock AG. Das Stromnetz wird durch die Stadtwerke Rostock Netzgesellschaft mbH betrieben. Über das Fernwärmenetz werden ca. 60 % des Wohngebäudebestandes versorgt und ungefähr 40 % des gesamten Wärmebedarfs gedeckt. Die Versorgung nicht an das Fernwärmenetz angeschlossener Gebäude geschieht überwiegend mit Gasheizungsanlagen, die über das Erdgasnetz versorgt werden.

Die Bereitstellung von Strom und Fernwärme erfolgt mittels Kraft-Wärme-Kopplung in einem Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk (GuD-HKW), das durch die Stadtwerke betrieben wird und über eine elektrische Leistung von 110 MW und eine thermische Leistung von 120 MW verfügt. Fernwärme wird zudem durch das Steinkohlekraftwerk Rostock mit einer thermischen Leistung von bis zu 150 MW ausgekoppelt. Der dort erzeugte Strom dient dagegen nur mittelbar der Versorgung der Stadt und wird direkt in das Übertragungsnetz eingespeist. Des Weiteren verfügen die Stadtwerke über gasgefeuerte Spitzenlastkessel zur Fernwärmebereitstellung. Sie wird zu rund 60 % durch die Stadtwerke und dementsprechend zu ca. 40 % durch das Steinkohlekraftwerk Rostock geliefert. Des Weiteren wird Strom in einem Ersatzbrennstoff-Heizkraftwerk (EBS-HKW) durch die thermische Verwertung von Abfällen erzeugt. Die Anlage verfügt über eine elektrische Leistung von 20 MW und liefert Prozesswärme an vertraglich gebundene Abnehmer aus der näheren Umgebung. Strom der über das Netz der Stadtwerke an Endkunden abgegeben wird, aber nicht durch Anlagen innerhalb der definierten Systemgrenzen erzeugt wird, gilt als zugekaufter Strom aus dem Bundesmix [11].

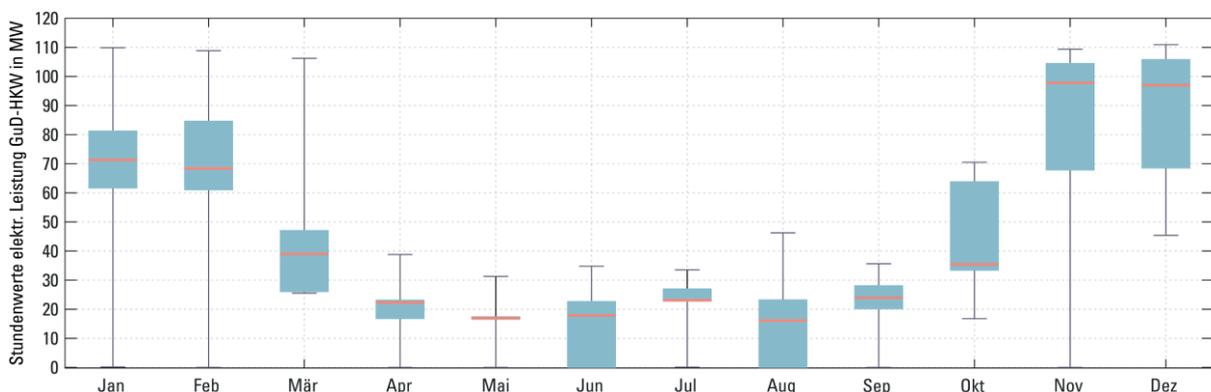
Relevante erneuerbare Erzeugungsanlagen, die in das Rostocker Stromnetz einspeisen, beschränken sich auf Windenergie- und Photovoltaikanlagen. Im Jahr 2015 waren insgesamt 618 Photovoltaikanlagen mit einer installierten Gesamtleistung von 17,77 MW und 21 Windenergieanlagen mit einer installierten Gesamtleistung von 20,3 MW an das Netz angeschlossen [12].

Um mögliche zukünftige Entwicklungen bewerten zu können, werden unterschiedliche Szenarien definiert und mit der Simulationssoftware *EnergyPLAN* modelliert. Zum einen wird mit einem Referenzszenario das derzeitige Energiesystem Rostocks abgebildet und zum anderen werden mit den Zukunftsszenarien mögliche Energiesysteme für das Jahr 2050 dargestellt. In den Zukunftsszenarien wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass sich die technologischen, gesellschaftlichen und politischen Gegebenheiten sowie das bisherige Konsumverhalten bezüglich Strom, Wärme und Mobilität und der Status Deutschlands als ein hochentwickeltes Industrieland nicht ändert.

3.1 Referenzszenario „HRO 2015“

Das Referenzszenario „HRO 2015“ beschreibt das im Jahr 2015 in der Hansestadt Rostock bestehende Energiesystem. Das Szenario basiert auf vorliegenden Vergangenheitsdaten und daraus abgeleiteten Annahmen. Darauf aufbauend wird mithilfe von *EnergyPLAN* ein Modell des Energiesystems erstellt. Die Endenergiebedarfe werden dabei als Randbedingungen in Form von Stundenwerten vorgegeben, ebenso die Stromeinspeisung der erneuerbaren Energien und des EBS-Heizkraftwerkes. Den Zeitreihen des Stromverbrauchs und der

erneuerbaren Stromeinspeisung liegen die entsprechend des Verbrauchs bzw. der Einspeisung in Rostock skalierten Daten der Regelzone 50Hertz zugrunde, die in [13] veröffentlicht sind. Die angenommene Einspeisung des EBS-HKW beträgt 120 GWh im Jahr. Sie erfolgt mit konstanter Leistung und beruht auf dem in [14] angegebenen Wirkungsgrad und Brennstoffverbrauch der Anlage. Die Jahresgesamtwerte der Fernwärmeabgabe sowie des Endenergieverbrauchs für die Wärmeerzeugung in den Haushalten – unterteilt nach Energieträgern – ist [15] und [11] entnommen. Des Weiteren ist die stündliche Fernwärmebereitstellung durch das Kohlekraftwerk bekannt und wird im Modell berücksichtigt. Der Endenergiebedarf im Mobilitätssektor berücksichtigt nur den Straßenverkehr und basiert auf den in Rostock zugelassenen und nach Kraftstoffarten untergliederten Kraftfahrzeugen sowie deren mittleren Jahresfahrleistungen und mittleren Verbräuchen [16, 15, 17]. Die Verbrauchsanteile von Bio-Diesel und Bio-Ethanol kommen durch die Biokraftstoffbeimischung zu Kraftstoffen auf Mineralölbasis zustande. Die Beimischung von Bio-Ethanol zu Ottokraftstoffen lag bei 6,4 %. Der Anteil von Biodiesel am insgesamt im Jahr 2015 verbrauchten Dieselmotorkraftstoff lag bei 5,83 % [18]. Diese Anteile werden bei den Kraftstoffverbräuchen berücksichtigt. Der Einsatz des GuD-Heizkraftwerkes wird durch das Modell berechnet. Dafür werden die installierte elektrische und thermische Leistung vorgegeben. Da der Betrieb der Anlagen wärmegeführt erfolgt, wird auch im Modell die Deckung des Wärmebedarfs priorisiert. Um eine Prüfung der Plausibilität der durch *EnergyPLAN* ermittelten Ergebnisse und eine rudimentäre Validierung des Modells durchzuführen, werden der tatsächliche und der durch das Programm berechnete Kraftwerkseinsatz verglichen. In der oberen Abbildung 2 ist die Verteilung der von *EnergyPLAN* berechneten Stundenwerte der elektrischen Leistung des GuD-HKW dargestellt. Zum Vergleich zeigt die untere Abbildung die tatsächliche Verteilung der stündlichen Stromeinspeisung des Jahres 2015. Betrachtet man zunächst die durch das Kraftwerk eingespeiste Jahresarbeit, so zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung des mit 375,8 GWh berechneten und des tatsächlichen Wertes von 384,0 GWh. Bei der monatlichen Verteilung der Einspeiseleistungen zeigen sich unter Berücksichtigung des Detaillierungsgrades des Modells gute Übereinstimmungen.



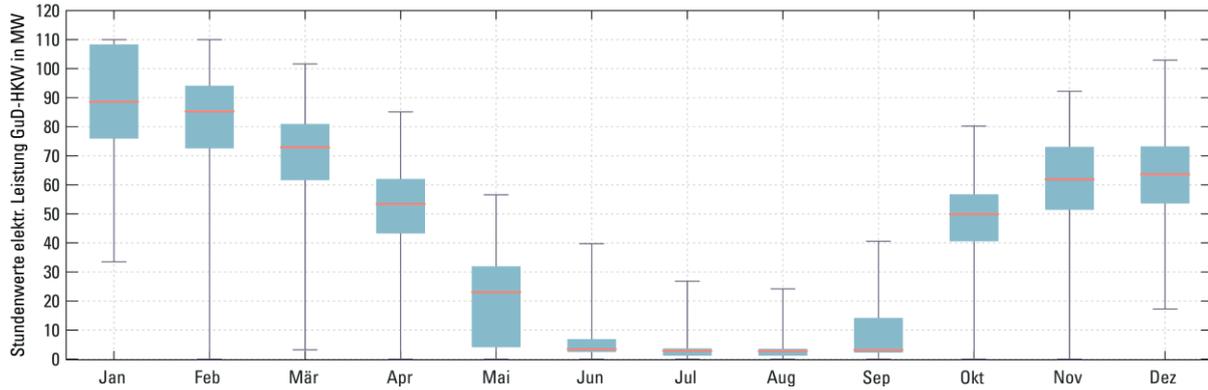


Abbildung 2: Vergleich der berechneten und der tatsächlichen Stromerzeugung durch das GuD-HKW Marienehe in MW

Größere Abweichungen bestehen in den Übergangsmonaten zwischen warmer und kalter Jahreszeit – März und April sowie September und Oktober –, was auf die Unterschiede zwischen dem tatsächlichen und dem angenommenen Wärmebedarfsverlauf zurückzuführen ist. Da dem Kraftwerk im Modell keine Mindestlast vorgegeben werden kann, treten, insbesondere in den Sommermonaten mit geringem Wärmebedarf, Leistungswerte auf, die unterhalb der Mindestleistung der Anlage liegen und im realen Betrieb nicht möglich sind. Der für die Modellierung verwendete Wärmebedarfsverlauf basiert auf den bekannten, außentemperaturabhängigen Wärmebedarfen für unterschiedliche Gebäudetypen und der in Rostock existierenden Anzahl und Größe dieser Gebäude. Insgesamt zeigt das Modell plausible, zufriedenstellende Ergebnisse. Somit ist davon auszugehen, dass mit *EnergyPLAN* valide Energiesysteme modelliert werden können.

Abbildung 3 stellt die Endenergiebedarfe in den einzelnen Sektoren sowie die jeweilige Zusammensetzung der Energiebereitstellung dar. Im Referenzszenario sind die Verbräuche in den einzelnen Sektoren sehr gut voneinander abgrenzbar, da weder im Wärme- noch im Mobilitätssektor nennenswerte Mengen an Strom verbraucht werden. Die Wandlungskette beginnend bei der Primärenergie über die Sekundär- und Endenergie bis zur Bereitstellung der Nutzenergie läuft für die Sektoren weitgehend getrennt voneinander ab, wodurch sich die unterschiedlichen Energiebedarfe sehr gut den einzelnen Sektoren zuordnen lassen. Bei einer in Zukunft vermehrten Nutzung von Sektorkopplungstechnologien wie Power-to-Heat und Elektromobilität, bei der Strom auch außerhalb des Stromsektors für die Wärmeerzeugung und für Mobilitätsanwendungen eingesetzt wird, ist die Trennung der Endenergieverbräuche in den Sektoren schwieriger. Um eine einheitliche Abgrenzung zu erreichen, wird die Endenergie in dem Sektor bilanziert, in dem sie verbraucht wird.

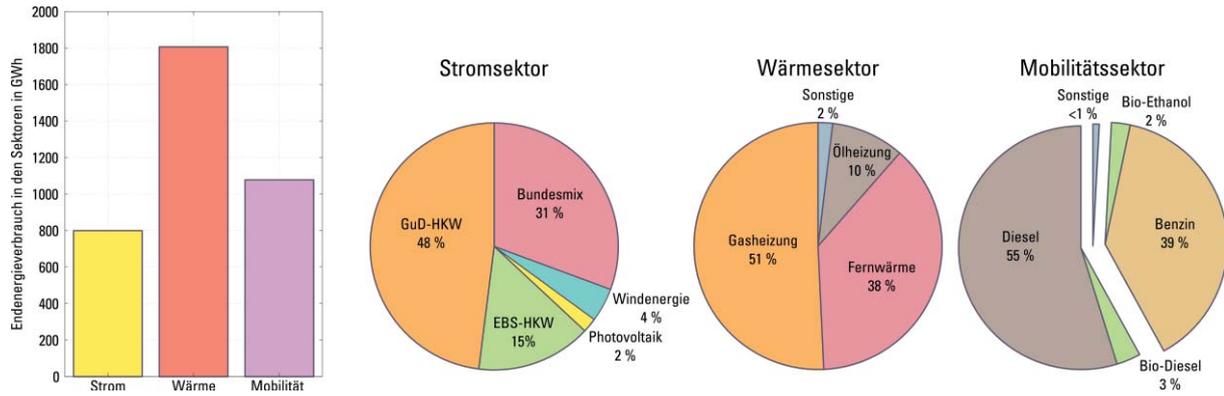


Abbildung 3: Energiebedarfs- und Versorgungsstruktur im Referenzszenario "HRO 2015"

3.2 Szenario „HRO 2050 Ziel“

Das Szenario „HRO 2050 Ziel“ wird unter der Maßgabe entwickelt, dass das Ziel, bis zum Jahr 2050 mindestens 80 % des Stroms aus erneuerbaren Quellen zu gewinnen, erreicht wird. Dafür ist ein ambitionierter Ausbau der erneuerbaren Energien erforderlich. Zudem ist ein Umbau des größtenteils erdgasbasierten Rostocker Energiesystems nötig, hin zu einem System, das in großem Umfang erneuerbare Energien nutzt und deren teils schwankendes Dargebot integrieren kann. Den Ansatz für die Entwicklung des Szenarios bilden die Energiebedarfe in den einzelnen Sektoren. Sie werden auf Basis der bekannten Bedarfe des Referenzjahres und der von der Bundesregierung in [10] definierten Ziele bestimmt. Daraus ergibt sich für den Stromsektor in Rostock, ausgehend von einer Bedarfssenkung bis 2050 um 25 % gegenüber 2008, ein Endenergiebedarf von 642,6 GWh. Im Wärmesektor wird, entsprechend der geplanten Senkung des Wärmebedarfs bis 2050 um 50 % bezogen auf 2008, eine Endenergiemenge in Höhe von 925 GWh benötigt. Bei einer Senkung des Endenergiebedarfs für Mobilität bis 2050 um 40 % gegenüber 2005, werden 690,7 GWh in Rostock benötigt. Abbildung 4 fasst die angenommenen Energiebedarfe und die zur Deckung benötigte Versorgungsstruktur zusammen.

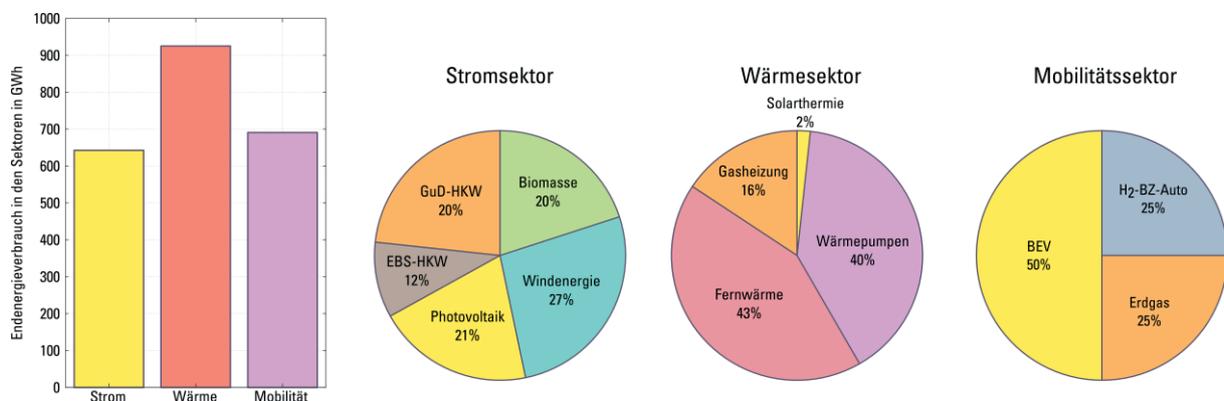


Abbildung 4: Energiebedarfs- und Versorgungsstruktur im Szenario "HRO 2050 Ziel"

3.3 Szenario „HRO 2050 100%“

In dem Szenario „HRO 2050 100 %“ wird ein Energiesystem für das Jahr 2050 entwickelt, dessen gesamter Primärenergiebedarf durch erneuerbare Energien gedeckt wird. Dafür ist ein weiterer Ausbau der Erneuerbaren und eine weitgehende Umstrukturierung des derzeitigen Versorgungssystems nötig. Das Energiesystem ist auf eine autarke Versorgung ausgelegt, was bedeutet, dass kein Strom und kein Gas importiert werden müssen. Allerdings reichen die Potenziale der erneuerbaren Energiequellen aus [11] nicht aus, um die Stadt zu 100 % zu versorgen und werden dementsprechend überschritten. Wie auch im Zielszenario werden die Energiebedarfe des Jahres 2050 auf Basis der Bedarfssenkungsziele der Bundesregierung ermittelt. Daher sind die Bedarfe des 100-%-Szenarios identisch mit denen des Zielszenarios. Das bedeutet, dass die Endenergiebedarfe im Stromsektor 642,6 GWh, im Wärmesektor 925 GWh und im Mobilitätssektor 690,7 GWh betragen. Abbildung 5 stellt die Endenergiebedarfe in den einzelnen Sektoren sowie die jeweilige Zusammensetzung der Energieversorgung des Szenarios dar.

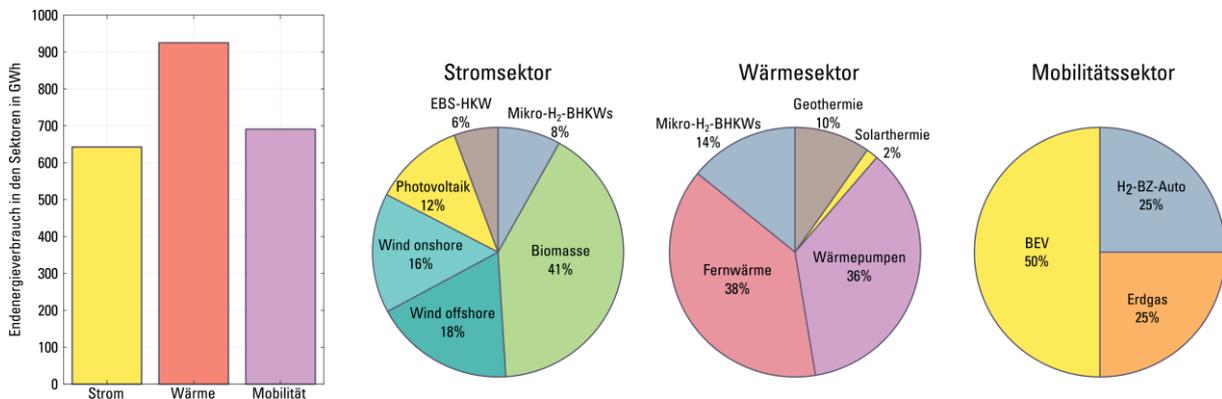


Abbildung 5: Energiebedarfs- und Versorgungsstruktur im Szenario "HRO 2050 100%"

4 Auswertung & Zusammenfassung

Die Bewertung der Szenarien muss hinsichtlich einzelner Zielkriterien erfolgen. Diese können zum Beispiel die einhergehenden Kosten, oder die CO₂-Emissionen sein. Hier soll sich auf die Auswirkungen auf das Stromsystem konzentriert werden. Mit der Nutzung elektrischer Energie in allen Sektoren wird Strom zum wichtigsten Energieträger. Deshalb ist trotz der Senkung des Verbrauchs im Stromsektor durch Nutzung von Einsparpotenzialen, insgesamt mit einem Anstieg des Strombedarfs zu rechnen. Dabei ist es weiterhin essentiell die Netzstabilität und eine hohe Versorgungssicherheit in allen Sektoren zu gewährleisten. In Abbildung 6 wird der Endenergieverbrauch von Strom im Stromsektor mit dem Endenergieverbrauch von Strom aller Sektoren verglichen. Da im Referenzszenario Strom nur in sehr begrenztem Umfang für Wärmeerzeugung und Mobilität genutzt wird, ist der Gesamtverbrauch von Strom nur unwesentlich höher als der Stromverbrauch im Stromsektor.

Im Zielszenario sinkt der Verbrauch im Stromsektor durch Effizienzsteigerungen und Einsparungen entsprechend der Klimaziele der Bundesregierung, die für das Szenario als Randbedingung vorgegeben werden.

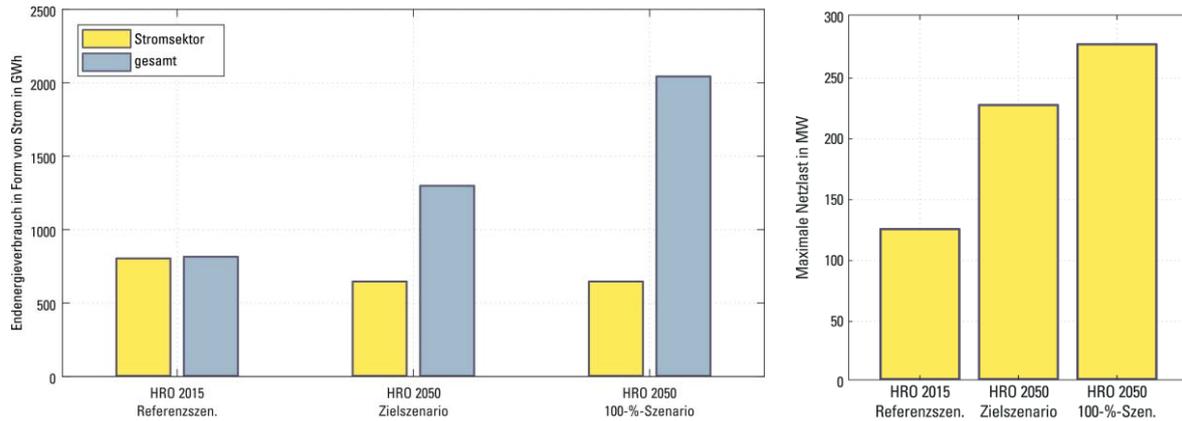


Abbildung 6: Endenergieverbrauch in Form von elektrischem Strom und maximale Netzlast in den Szenarien

Der Endenergiebedarf an Strom aller Sektoren steigt jedoch deutlich an. Gegenüber dem Referenzszenario beträgt die Zunahme 60 %. Im 100-%-Szenario wird die Nutzung von Strom in den Sektoren Wärme und Mobilität weiter ausgebaut. Dementsprechend steigt auch der Endenergiebedarf in Form elektrischen Stroms. Gegenüber dem Referenzszenario beträgt der Bedarf mehr als das Doppelte bei einer 100-prozentigen erneuerbaren Energieversorgung. Die elektrische Energie muss über die Übertragungs- und Verteilnetze transportiert werden. Aus dem gestiegenen Bedarf folgt eine höhere Belastung der Netze, wie der rechte Teil der Abbildung 6 zeigt. Dargestellt ist der im jeweiligen Szenario maximal aufgetretene Stundenwert der Netzlast. Es zeigt sich, dass durch die vermehrte Nutzung von Strom auch außerhalb des Stromsektors die maximale Netzlast steigt. Daraus folgt, dass neben dem Aufbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten auch die Netzkapazitäten erhöht werden müssen. Ein modernes und leistungsfähiges Stromnetz ist eine entscheidende Voraussetzung für eine Stromversorgung mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien, weswegen der Ausbau der Netzinfrastruktur beschleunigt werden sollte. Dabei müssen neben den Übertragungsnetzen auch die Verteilnetze berücksichtigt werden, die den Strom zu den Endverbrauchern liefern.

Die Software *EnergyPLAN* wurde aufgrund der Möglichkeit der Modellierung aller drei Energiesektoren, der umfangreichen Implementation von Sektorenkopplungstechnologien und der Berechnung stundengenauer Werte als geeignetes Programm ausgewählt. Die Energieflussmodellierung ist ein effizientes Instrument, um sektorengekoppelte Energiesysteme abzubilden. Die Ergebnisse eignen sich, um eine umfassende Bewertung der technischen Potenziale von Sektorenkopplungstechnologien vorzunehmen und mögliche Entwicklungspfade zukünftiger Energiesysteme aufzuzeigen. Mittels einer Sensitivitätsanalyse durch die Variation der Art und Anteile der verwendeten Kopplungstechnologien kann die optimale Kombination für einen effizienten und nachhaltigen Betrieb des Energiesystems ermittelt werden. Zudem kann durch eine Erweiterung der Systemgrenzen der notwendige überregionale Strom- und Energieaustausch berücksichtigt werden.

5 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt ist durch den Europäischen Sozialfonds (ESF) und durch das Bundesland Mecklenburg-Vorpommern im Rahmen der Landesexzellenzinitiative „NetzStabil“ gefördert (Projekt-nummer: 63160020231043-74).



6 Literatur

- [1] Palzer, Andreas; Henning, Hans-Martin: A future German energy system with a dominating contribution from renewable energies: A holistic model based on hourly simulation. In: *Energy Technology* 2 (2014), Nr. 1, S. 13–28
- [2] Kunz, Claudia; Kirrmann, Sven: *Die neue Stromwelt: Szenario eines 100 % erneuerbaren Stromversorgungssystems*. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien, 2015 (abgerufen am 5. Juli 2017) <https://www.unendlichviel-energie.de/mediathek/studien/>
- [3] Benson, Christopher L.; Magee, Christopher L.: On improvement rates for renewable energy technologies: Solar PV, wind turbines, capacitors, and batteries. In: *Renewable energy* 68 (2014), S. 745–751
- [4] Sawin, Janet L.; Seyboth, Kristin; Sverrisson, Freyr: *Renewables Global Status Report*. Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), 2017 (abgerufen am 26. Juni 2017) <http://www.ren21.net/statusof-renewables/global-status-report>
- [5] Edenhofer, Ottmar; Pichs-Madruga, Ramón; Sokona, Youba; Seyboth, Kristin; Kadner, Susanne; Zwickel, Timm: *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation - Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011
- [6] Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Naegler, Tobias: *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*. Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Technische Thermodynamik, 2012 (abgerufen am 26. Juni 2017) <http://elib.dlr.de/76043/>
- [7] Faulstich, Martin; Foth, Heidi; Calliess, Christian; Hohmeyer, Olav; Holm-Müller, Karin; Niekisch, Manfre ; Schreurs, Miranda: *Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung*. Berlin: Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2011 [http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_07_SG_Wege_zur_100_Pr ozent_erneuerbaren_Stromversorgung.html](http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_07_SG_Wege_zur_100_Pr_ozent_erneuerbaren_Stromversorgung.html)
- [8] Sterner, Michael; Stadler, Ingo: *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. 1. Aufl. Berlin u. a.: Springer-Verlag, 2014
- [9] Quaschnig, Volker: *Sektorkopplung durch die Energiewende – Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung*. Berlin: Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 2016
- [10] Varone, Alberto; Ferrari, Michele: Power to liquid and power to gas: an option for the German Energiewende. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015), S. 207–218
- [11] Hansestadt Rostock: *Masterplan 100% Klimaschutz für die Hansestadt Rostock*. 2013 http://rathaus.rostock.de/sixcms/media.php/144/Masterplan_20140403.pdf
- [12] 50Hertz Transmission GmbH: *EEG-Anlagenstammdaten*. 2015
- [13] European Network of Transmission System Operators for Electricity: *Transparency Platform*. 2017 (abgerufen am 8. Juli 2017) <https://transparency.entsoe.eu/>
- [14] Vattenfall Europe New Energy Ecopower GmbH: *Abfallentsorgung mit Kraft-WärmeKopplung – EBS-HKW Rostock*. 2013 <https://blog.vattenfall.de/va-content/uploads/2016/08/Abfall-Entsorgung-EBS-HKW-Rostock.pdf>
- [15] Hansestadt Rostock, Hauptamt Kommunale Statistikstelle: *Statistisches Jahrbuch 2016*. Rostock: Hansestadt Rostock, 2016
- [16] Kraftfahrt-Bundesamt: *Statistiken*. 2017 https://www.kba.de/DE/Statistik/statistik_node.html
- [17] Lenz, Barbara Lischke, Andreas; Knitschky, Gunnar; Adolf, Jörg; Balzer, Christoph; Haase, Frank: *Shell Nutzfahrzeug-Studie. Diesel oder alternative Antriebe - Womit fahren Lkw und Bus morgen?* Shell Deutschland Oil GmbH, 2016 <http://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shellnutzfahrzeug-studie.html>
- [18] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: *Amtliche Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland*. Dezember 2015 http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel/amtliche_mineraloeldaten/index.html
- [19] Bundesregierung Deutschland: *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. 2010 (abgerufen am 9. August 2017) https://www.bundesregierung.de/Content/Archiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.html. – Beschluss des Bundeskabinetts vom 28. September 2010