

Regionalbezogene Bestimmung von Verbrauch und Erzeugung im Wärme- und Stromsektor zur Bewertung von Ausgleichspotenzialen der Sektorenkopplung

Anne Hagemeier, Christine Settgast

Fraunhofer Institut für Umwelt-Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Osterfelder Str. 3,
46047 Oberhausen, 0208 8598-1452, anne.hagemeier@umsicht.fraunhofer.de,
www.umsicht.fraunhofer.de

Kurzfassung:

Mit voranschreitender Energiewende steigt der Anteil der Erneuerbaren Energien, deren tageszeitliche, saisonale und regionale Schwankungen zu einem erhöhten Energieausgleichsbedarf führen. Dabei ist die Entwicklung in Deutschland nicht überall gleich, sondern die durch die Energiewende entstehenden Herausforderungen unterscheiden sich von Region zu Region. Um die regionalen Energieausgleichsbedarfe und die regionalen Voraussetzungen für eine Kopplung des Wärme- und Stromsektors zu ermitteln, wurde ein Modell zur Abbildung regionaler Stromverbrauchs- und Erzeugungsstrukturen weiterentwickelt und um den Wärmesektor erweitert. In dieser Veröffentlichung liegt der Fokus auf der Berechnung der regionalen Last und erneuerbaren Erzeugung. Die Datenbasis und Annahmen werden erläutert und erste Auswertungen, insbesondere im Hinblick auf die Sektorenkopplung, vorgenommen. Als Resultat der Modellerweiterung ergeben sich stündlich aufgelöste Lastgänge des Wärme- und Strombedarfs, sowohl für die heutigen Gegebenheiten, als auch für zukünftige Szenarien. In deren Auswertung werden strukturelle Unterschiede der Regionen deutlich, aus denen Voraussetzungen für den Einsatz von Sektorenkopplungstechnologien abgeleitet und regionale Ausgleichspotenziale für die Sektorenkopplung ermittelt werden können.

Keywords: Sektorenkopplung, Ausgleichspotenziale, Regionale Betrachtung

1 Motivation und Zielstellung

Der steigende Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien führt zunehmend zu Herausforderungen in den Stromnetzen. Dies ist bedingt durch die tageszeitliche, saisonale und regionale Schwankung der Erzeugung, die nicht notwendigerweise mit dem Verbrauch korreliert, sodass ein sowohl zeitlicher als auch räumlicher Ausgleichsbedarf entsteht. Um diese Ungleichgewichte zu beheben, werden verschiedene Lösungsansätze diskutiert. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Sektorenkopplung. Sektorenkopplung ist dabei ein weiter Begriff, der beispielsweise die Kopplung des Stromsektors mit dem Wärme- und Gassektor,

dem Verkehrssektor, aber auch mit der chemischen Produktion umfassen kann (Lund et al. 2017).

In dieser Veröffentlichung wird vornehmlich die Kopplung zwischen dem Wärme- und Stromsektor betrachtet. Doch auch innerhalb dieser Definition gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Ausprägungen der Sektorenkopplung. Unterschiede bestehen beispielsweise in der eingesetzten Technologie (Wärmepumpe, direkte elektrische Erwärmung oder KWK) und dem Einsatzzweck (z.B. marktdienlicher oder netzdienlicher Einsatz). Weiterhin kann zwischen einem dezentralen Einsatz von kleineren Anlagen in Haushalten oder Betrieben (Niederspannungsebene), einem Einsatz von größeren Anlagen in Wärmenetzen und Industriebetrieben (Mittelspannungsebene) oder einem zentralen Einsatz auf höheren Netzebenen unterschieden werden.

Dabei liegen in den einzelnen Regionen Deutschlands sehr unterschiedliche Voraussetzungen für die verschiedenen Kopplungstechnologien vor. Zwischen den Regionen gibt es Unterschiede im Anteil der Verbrauchssektoren (Haushalte, Industrie, Gewerbe-, Handels-, Dienstleistungssektor (GHD), Industrie), in der Verbrauchsdichte und der regionalen erneuerbaren Erzeugung. Weiterhin liegen je nach Ausbauzustand der erneuerbaren Erzeugung unterschiedliche Ausgleichsziele vor. Um diese unterschiedlichen Voraussetzungen zu erfassen und somit passende regionale Lösungen für den Einsatz der Sektorenkopplung untersuchen zu können, wurden Wärme- und Stromverbrauch sowie -erzeugung regionalbezogen erfasst. Die Untersuchung ist eingebettet in das Forschungsprojekt IntegraNet, das zur Zielstellung hat, die Potenziale der Sektorenkopplung zum Energieausgleich auf verschiedenen Ebenen zu untersuchen.

2 Modell

Die in dieser Veröffentlichung beschriebene Untersuchung baut auf das Projekt „Bedarfsanalyse Energiespeicher“ (BAES) (Fraunhofer UMSICHT und Fraunhofer IOSB/AST 2013) auf. Das dort entwickelte Modell MELENA (**M**odel for the **E**stimation of **L**ocal **E**nergy **B**alancing **D**emand) wurde um den Wärmesektor erweitert, die Datenbasis aktualisiert und die Verbrauchsdaten für den Stromsektor in einem höheren Detailgrad erfasst, indem zwischen Haushaltstypen und Branchen des GHD-Sektors unterschieden wurde.

In MELENA wird die regionale Erzeugung (erneuerbar und fossil) sowie der regionale Verbrauch berechnet, sodass der inner- und überregionale Energieausgleichsbedarf in stündlicher Auflösung bestimmt werden kann. Das Modell besteht aus drei Untermodeilen, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Eine detaillierte Beschreibung des Modells wird in (Fraunhofer UMSICHT und Fraunhofer IOSB/AST 2013) gegeben.

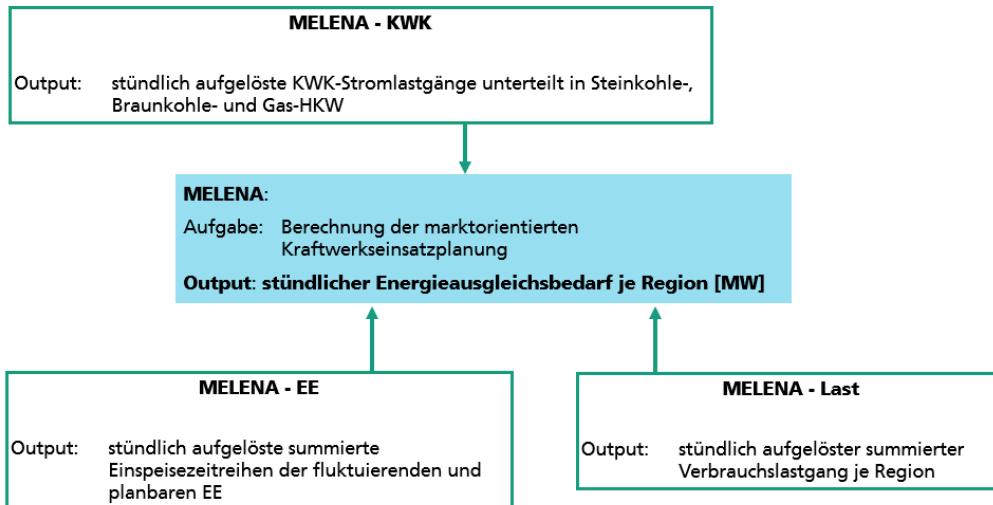


Abbildung 1: Funktionsweise MELENA (Fraunhofer UMSICHT und Fraunhofer IOSB/AST 2013)

Ziel des Einsatzes von MELENA ist es, aufzuzeigen, in welchen Regionen welche Art des Energieausgleichsbedarfs auftreten wird. Auf Basis der Ergebnisse kann bestimmt werden, welche Maßnahmen zur Kompensation des Energieausgleichsbedarfs getroffen werden sollten.

Die Auflösung der Bilanzierung von Verbrauch und Erzeugung im Wärme-, Strom- und Gassektor ist die Ebene der Landkreise (NUTS 3-Ebene), da viele statistische Daten für diese Ebene vorliegen. Die Analyse des Energieverbrauchs erfolgt jeweils für die Sektoren Haushalte, GHD und Industrie. Im Projekt BAES wurden die Landkreisdaten für benachbarte und strukturell ähnliche Landkreise aggregiert, um eine geringere Anzahl zu vergleichender Regionen zu erhalten. So resultierte eine Anzahl von 146 Regionen. In der aktuellen Veröffentlichung wurde auf diesen Aggregationsschritt verzichtet, sodass die Ergebnisse höher aufgelöst für 402 Landkreis vorliegen. Weiterhin wurden die Verbräuche für die einzelnen Branchen des GHD-Sektors einzeln erfasst, während der Sektor zuvor pauschal abgebildet wurde. Während die Annahmen für die zukünftige Entwicklung des Verbrauchs zuvor keine regionalen Unterschiede aufwiesen, werden diese nun in der Modellerweiterung betrachtet.

3 Bilanzierung der heutigen regionalen Verbrauchs- und Erzeugungsstrukturen des Wärme- und Stromsektors

Es wurde jeweils der Wärme- und Strombedarf der drei Sektoren Haushalte, GHD und Industrie bestimmt. Das Vorgehen wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

3.1.1 Haushalte

Der Wärmebedarf der Haushalte basiert auf der Wohnfläche in der Region sowie dem Baualter der Wohngebäude. Die Anzahl der Wohnungen in Gebäuden eines bestimmten Baualters in den einzelnen NUTS-Regionen wurde in der Zensus-Umfrage 2011 (Statistische Ämter des Bundes und der Länder) erhoben. Unterschieden wird weiterhin zwischen Wohnungen in Ein- und Mehrfamilienhaushalten, wobei mangels detaillierterer Daten die Annahme getroffen

wurde, dass sich der Anteil der Wohnungen in der jeweiligen Baualtersklasse gleichmäßig auf die Ein- und Mehrfamilienhäuser im jeweiligen Landkreis verteilt. Der spezifische Energieverbrauch pro Wohnfläche in Abhängigkeit des Baualters und des Gebäudetyps wurde (Walberg et al. 2011) entnommen. Über die Anzahl der Wohngebäude des jeweiligen Gebäudetyps und der durchschnittlichen Fläche einer Wohnung im Landkreis wurde der Wärmebedarf der Haushalte im Landkreis bestimmt.

Um den Strombedarf der Haushalte zu bestimmen, wurde der Stromverbrauch pro Haushalt in Abhängigkeit der Haushaltsgröße und dem Gebäudetyp, in dem sich der Haushalt befindet, mit der Anzahl der Haushalte der jeweiligen Haushaltsgrößenklasse multipliziert. Die Anzahl der Haushalte entstammt wiederum der Zensuserhebung. Der Energieverbrauch in Abhängigkeit von Haushaltgröße und Gebäudetyp wurde (Stieß et al. 2017) entnommen.

Der so ermittelte jährliche Energiebedarf der Haushalte wird über die elektrischen Lastprofile des VDEW (Meier et al. 1999) bzw. die Gas-Standardlastprofile des BDEW (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. et al. 2015), (Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW) 2007) in einen stündlichen Lastgang überführt.

3.1.2 GHD-Sektor

Der deutschlandweite Wärme- und Strombedarf einzelner Branchen des GHD-Sektors wurde in (Schlomann et al. 2015) für Deutschland bilanziert. Dazu wurde der Energieverbrauch in Abhängigkeit einer Bezugseinheit (zumeist die Beschäftigtenzahlen) ermittelt und mit dieser Bezugseinheit multipliziert.

Um die Wärme- und Strombedarfe regionalbezogen zu erfassen, wurde für die für den Wärme- und Stromverbrauch relevantesten Branchen ein ähnliches Vorgehen auf Landkreisebene verfolgt. Die Bezugseinheiten wurden dabei je nach Datenverfügbarkeit zum Teil abweichend gewählt. Die untersuchten Branchen, die gewählten Bezugseinheiten sowie die verwendeten Quellen sind in Tabelle 3-1 spezifiziert. Die Verbräuche der übrigen Branchen wurden unter „Sonstige“ zusammengefasst.

Tabelle 3-1: Datenquellen für die Erfassung der regionalen Wärme- und Strombedarfe

Verbrauchs- bereich	Bezugs- einheit	Quelle Bezugs- einheit	Quelle Wärme- bedarf pro Bezugseinheit	Quelle Strom- bedarf pro Bezugseinheit
Büro- gebäude	Bürofläche	(Henger et al. 2016) ¹	(Henger et al. 2017)	(Bayer et al. 2011)
Groß- und Einzel- handel	Einwohner- zahl	(Statistische Ämter des Bundes und der Länder)	(Atzberger et al. 2015), (Schlomann et al. 2015)	(Atzberger et al. 2015), (Schlomann et al. 2015)

¹ Die Rohdaten der Bürofläche zu (Henger et al. 2016) wurden auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Krankenhäuser	Bettenzahlen Bundes und der Länder 2010)	(Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2010)	(Tippkötter et al. 2009)	(Tippkötter et al. 2009)
Schulen und Kinder- gärten	Schüler- zahlen, Kindergarten- plätze	(Statistische Ämter des Bundes und der Länder)	Eigene Erhebung auf Basis kommunaler Energieberichte	Eigene Erhebung auf Basis kommunaler Energieberichte
Hotels	Gästebetten je Region	(Statistische Ämter des Bundes und der Länder)	(Voss und Soara Bernard 2015)	(Voss und Soara Bernard 2015)
Gaststätten	Erwerbstätige (Bundesagent ur für Arbeit 2017)		(Schlomann et al. 2015)	(Schlomann et al. 2015)
Land- wirtschaft und Gartenbau	Agrarfläche, Anzahl der Betriebe je Betriebsklasse	(Statistische Ämter des Bundes und der Länder)	(Schlomann et al. 2015)	(Neiber 2014)

Auch hier wurden die jährlichen Energiebedarfe über die Standardlastprofile des VDEW/BDEW in Verbrauchsprofile in stündlicher Auflösung umgerechnet.

Indem die einzelnen Branchen separat erfasst wurden, stehen nicht nur Gesamtverbräuche des GHD-Sektors zur Verfügung, sondern höher aufgelöste Daten, die es ermöglichen, die Potenziale einzelner Branchen für den Energieausgleich gezielt zu untersuchen und die Lastgänge mit größerer Detailtiefe zu modellieren.

3.1.3 Industrie

Für den Wärme- und Strombedarf der Industrie stehen in den Regionalstatistiken des Statistischen Bundesamtes (Statistische Ämter des Bundes und der Länder) die Daten auf Landkreisebene zur Verfügung. Diese Daten sind jedoch nicht vollständig, sodass Annahmen für die fehlenden Daten getroffen werden müssen. Hierbei wird auf Informationen zu Standorten der energieintensiven Industrie zurückgegriffen (Pezzuto et al. 2018) und Korrelationen zu Beschäftigtenzahlen des produzierenden Gewerbes durchgeführt (Statistische Ämter des Bundes und der Länder).

In der Regionalstatistik werden jedoch nur die Endenergeträger ausgewiesen, die sowohl für Wärme- und Stromzwecke eingesetzt werden können. Brennstoffe können sowohl als Rohstoff in die industriellen Prozesse eingehen, zu reinen Wärmezwecken verfeuert oder in KWK-Anlagen zu Wärme und Strom umgewandelt werden. Für die Analyse ist es vor allem relevant,

welcher Brennstoffbedarf durch Strom ersetzt werden kann, unabhängig davon, ob der Brennstoff für die Stromerzeugung oder direkt zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird.

Durch die große Diversität der industriellen Betriebe liegen für den Industriesektor keine Referenz- oder Standardlastprofile vor. Für den Stromverbrauch werden die im Projekt BAES ermittelten Lastprofile für durchgängige und nicht-durchgängige Produktion verwendet. Für den Wärmebedarf wurde angenommen, dass 90% des Wärmebedarfs der Industrieprofile Prozesswärme sind, die unabhängig von der Außentemperatur anfällt. Die verbleibenden 10% wurden nach den Gas-Standardlastprofilen für den GHD-Sektor verteilt.

3.2 Wärmeversorgung

Nach der Ermittlung der Wärme- und Strombedarfe werden im nächsten Schritt die Anteile verschiedener Wärm 技术ologien an der Deckung des jeweiligen Wärmebedarfs in den Landkreisen zugeordnet. Landkreisscharfe Daten können der Zensusbefragung entnommen werden, jedoch wurde hierbei nicht nach Energieträger, wie es für diese Auswertung interessant ist, sondern zwischen Fern-, Etagen-, Block-, Zentral- und Einzel-/Mehrraumheizungen unterschieden. Daher wird zunächst in jedem Landkreis der Anteil der mit Fernwärme versorgten Wohnungen anhand der Zensusdaten festgelegt. Laut (BDEW 2015) sind ein Drittel der Einzelheizungen elektrische Speicherheizungen, sodass ein Drittel der laut Zensusdaten über Einzelheizungen versorgten Wohnungen zu elektrischen Speicherheizungen gezählt wurden. Die verbleibenden Wohnungen wurden nach den Anteilen des deutschen Wärm 技术ologiemixes (BDEW 2015) den übrigen Technologien zugeordnet.

3.3 Erneuerbare Erzeugung

Die Energiemengen der erneuerbaren Erzeugung mit Stand 2015 wurden aus dem Anlagenregister der EnergyMap (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS)) bezogen und aufbereitet, indem unplausible Werte korrigiert wurden. Für Biomasse, Wasserkraft und Geothermie wurde eine über das Jahr konstante Erzeugung angenommen. Für Solarenergie und Windkraft wurden die bereits im Projekt BAES verwendeten Einspeisezeitreihen des DLR aus dem Modell REMix (Scholz 2012) für das Basisjahr 2006 verwendet, die auf die angepassten Energiemengen der Erzeugung im Jahr 2015 skaliert wurden.

4 Annahmen zur künftigen Verbrauchs- und Technologieentwicklung

Um zentrale Szenarioannahmen auf die Landkreise herunterzubrechen, wurde ein Verteilungsschlüssel entwickelt. Die dazu getroffenen Annahmen werden im Folgenden erläutert. Das bisherige Modell erfasste lediglich die heutigen Daten regionalbezogen, Annahmen für die zukünftige Entwicklung des Verbrauchs wurden pauschal für alle Landkreise gleich getroffen. Auch hier ist das aktualisierte Modell genauer, indem regional unterschiedliche Annahmen für die Entwicklung von Verbrauch und Versorgung in den Landkreisen getroffen werden.

4.1 Zukünftige Entwicklung des Wärme- und Stromsektors

Für die zukünftige Entwicklung wird ein zentrales Szenario für das gesamte Bundesgebiet für das Jahr 2050 definiert. Die wichtigsten zentralen Annahmen sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Zentrale Szenarioannahmen

Größe	Wert
Installierte Leistung [GW]:	
Wind onshore	80
Wind offshore	30
PV	80
Biomasse	8
Wasserkraft	6
Geothermie	1
Einwohnerzahl Deutschland [Mio. Einwohner]	74
Wärmebedarf [TWh/a]:	
Haushalte	356
GHD	135
Industrie	350
Strombedarf [TWh/a]:	
Haushalte	124
GHD	135
Industrie	166
Anteil an der Wärmeversorgung der Haushalte:	
Wärmepumpe	22%
Fernwärme	18%

4.2 Zukünftige Entwicklung der Versorgungstechnologien

Auch für die Anteile der verschiedenen Versorgungstechnologien an der Deckung des Wärmebedarfs werden Annahmen für die Zukunftsszenarien getroffen. Diese werden zentral für Deutschland für die Gebäudetypen EFH und MFH sowie für Gebäude des GHD-Sektors vorgegeben. Für Technologien, die in Zukunft eine große Rolle spielen, die heute aber noch kaum vertreten sind, werden absolute Anteile an der Deckung des Wärmebedarfs vorgegeben. Dazu zählen Wärmepumpen, Solarthermieanlagen, KWK-Anlagen sowie Pelletkessel. Für Nachspeicherheizungen, Fernwärme und Öl kessel wird eine relative Änderung im Vergleich zum heutigen Wert vorgegeben. Der Anteil der Gaskessel ergibt sich dementsprechend. Durch die unterschiedlichen Ausgangswerte der Verteilung in den Landkreisen und die unterschiedlichen Anteile der Gebäudetypen kommt es auch hierbei zu unterschiedlichen Entwicklungen in den Regionen. Die durchschnittlichen Anteile für Deutschland sind in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Tabelle 4-2: Anteile einzelner Wärmeversorgungstechnologien an der Wärmeversorgung

Technologie	Anteil an der Wärmeversorgung	
	Haushalte	GHD
Elektrische Wärmepumpe (Luft-Wasser)	13,4%	7,1%
Elektrische Wärmepumpe (Sole/Wasser-Wasser)	8,1%	4,1%
Gas-WP	3,9%	3,2%
Gas-KWK	7,3%	11,7%
Holz-/Pelletkessel	3,6%	6,8%
Solarthermie	11,5%	1,9%
Nachtspeicherheizung	2,2%	2,3%
Fernwärme	17,9%	11,0%
Ölkessel	5,7%	16,6%
Gaskessel	22,4%	32,3%

4.3 Regionale Verteilung der zentralen Szenarioannahmen

Um diese Szenarioannahmen auf die strukturell unterschiedlichen Regionen zu verteilen, wurde ein Verteilungsschlüssel entwickelt, mit dem die Entwicklungen für Deutschland nach verschiedenen Annahmen auf die einzelnen Regionen übertragen werden können (Wieland 2018).

4.3.1 Regionale Verteilung des Wärme- und Stromverbrauchs

Im Verteilungsschlüssel werden die zentralen Annahmen anhand verschiedener Faktoren auf die Regionen verteilt (siehe Tabelle 4-3).

Tabelle 4-3: Einflussfaktoren auf die regionale Verteilung des Wärme- und Stromverbrauchs

	Einflussfaktoren auf den Strombedarf	Einflussfaktoren auf den Wärmebedarf
Haushalte	Bevölkerungsentwicklung, Bevölkerungszusammensetzung, Haushaltzzusammensetzung, Neugeräte im Haushalt, Effizienzsteigerungen bei Haushaltsgeräten, Anzahl Elektrofahrzeuge pro Haushalt	Neubaurate, Abrissrate, Sanierungsrate (jeweils in Abhängigkeit des Baualters)
GHD	Allgemeine Effizienzsteigerungen, Änderungen Bezugsgrößen einzelner Branchen (z.B. Bürofläche, Planbetten in Krankenhäusern, landwirtschaftlich	Faktor für Effizienzsteigerung GHD-Gebäude

genutzte Fläche),
Bevölkerungsentwicklung

Industrie Entwicklung des BIP, Energieproduktivität der Industrie

Da sich die Regionen in Bezug auf die Zusammensetzung der Gebäudetypen, des Gebäudealters und des GHD-Sektors unterscheiden, wirken sich die Einflussfaktoren in den Regionen jeweils unterschiedlich aus. Bei der Bevölkerungsentwicklung wird zwischen wachsenden und schrumpfenden Regionen unterschieden und daher unterschiedliche Werte für die Bevölkerungsentwicklung in diesen Regionen vorgegeben. Die Einteilung in wachsende und schrumpfende Regionen basiert auf der Entwicklung in den vergangenen Jahren (BBSR 2015).

Für Wohngebäude können Neubaurate, Sanierungsrate und Abrissrate jeweils in Abhängigkeit des Baualters festgelegt werden. Der Stromverbrauch im Haushaltssektor wird einerseits beeinflusst durch die Steigerung des Strombedarfs durch Neugeräte, andererseits durch eine Stromeinsparung durch Effizienzsteigerungen bei Geräten. Weiterhin ist die Anzahl und Art der Haushalte und Betriebe entscheidend. Für Effizienzsteigerungen und die Steigerung des Strombedarfs werden Werte vorgeben. Die Struktur der Haushalte und Betriebe wird durch die Bevölkerungsentwicklung und weitere Faktoren beeinflusst.

4.3.2 Regionale Verteilung der erneuerbaren Erzeugung

Für die erneuerbare Erzeugung muss der Zubau im Vergleich zu heutigen Werten, der nötig ist, um die zentral vorgegebenen Szenariowerte zu erreichen, auf die Landkreise verteilt werden. Dazu werden technologiespezifische Annahmen getroffen.

Für Wasserkraft wird angenommen, dass die möglichen Standorte weitgehend erschlossen sind und eine Steigerung der installierten Leistung somit nur durch den Austausch von Anlagenkomponenten und Zubau an den bisherigen Standorten geschehen kann. Für die Geothermie wird die zugebaute Leistung anhand der Geothermiepotenziale der Landkreise verteilt (Schulz et al. 2013), wobei nur Regionen mit einem hydrothermischen Potenzial > 130°C ein Zubau zugeteilt wurde.

Um die zugebaute PV-und Windleistung zu verteilen, wurden die maximalen Potenziale für Frei- und Dachflächen-PV sowie die Windleistung erhoben (Fraunhofer UMSICHT und Fraunhofer IOSB-AST 2017). Der Zuwachs in den einzelnen Landkreisen orientiert sich an den verfügbaren Potenzialen, sodass die Landkreise mit den höchsten Potenzialen den höchsten Zuwachs verzeichnen. Für Biomasse wird den Landkreisen mit den größten Landwirtschafts- und Waldfächern der stärkste Zuwachs zugeordnet.

5 Ergebnisse

5.1 Strukturelle Unterschiede in den Landkreisen

Für den Einsatz verschiedener Technologien der Strom-Wärme-Kopplung gibt es unterschiedliche Rahmenbedingungen bezüglich des Einsatzortes. Die Kopplung des Wärme- und Stromsektors über Kraft-Wärme-Kopplung wird bisher vor allem in größeren Anlagen, wie

in Nah- und Fernwärmenetzen, größeren Gebäuden des GHD-Sektors und der Industrie durchgeführt, in denen auch im Sommer noch ein Wärmebedarf vorliegt. Für kleinere Einheiten, insbesondere in Ein- oder Zweifamilienhäusern, ist der Einsatz zumindest nach heutigen Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich (VDE 2015). Im Gegensatz dazu finden Wärmepumpen insbesondere in Ein- und Zweifamilienhäusern Anwendung. Großwärmepumpen werden als vielversprechende Technologie für den Einsatz in Wärmenetzen und der Industrie gewertet, die bisher aber noch keine große Verbreitung erlangt hat (Appelhans et al. 2014). Eine weitere mögliche Umsetzung der Kopplung der Sektoren ist die direkte Wärmeerzeugung aus Strom. Dies ist in jedem Einsatzbereich möglich. Diskutiert wird sowohl der Einsatz von Heizpatronen in Heizungs- und Trinkwarmwasserspeichern in Haushalten als auch der zentrale Einsatz von Elektrodenkesseln in Fernwärmesystemen und der Industrie (Agora Energiewende 2014).

Somit hat der Anteil der Gebäudetypen in den jeweiligen Regionen einen Einfluss auf die Verteilung von Kopplungstechnologien. In Abbildung 2 sind strukturelle Unterschiede der Regionen dargestellt, indem der Anteil der Fernwärme an der Wärmeversorgung der Haushalte und der Anteil der Mehrfamilienhäuser an den Wohngebäuden abgebildet ist.

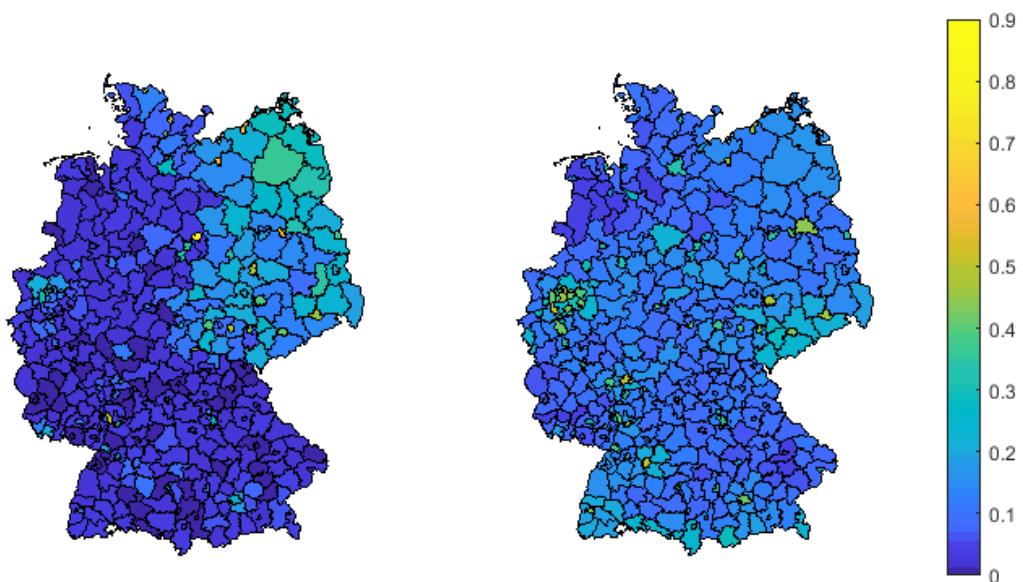


Abbildung 2: Anteil der Wohnungen mit Fernwärmeversorgung (links) und Anteil der Mehrfamilienhäuser an den Wohngebäuden

In den größeren Regionen schwankt der Anteil an Mehrfamilienhäusern und fernwärmeverSORGten Wohnungen zwischen 0 und 40%. In kleineren Regionen, die zumeist kreisfreie Städte sind, werden deutlich höhere Anteile an Fernwärme und Mehrfamilienhäusern erreicht. Stromgeführte Steuerungen von KWK-Anlagen werden also vor allem in den Regionen einen hohen Einfluss auf die Lastkurven haben, in denen viel Fernwärme installiert ist oder viel Industriewärme auftritt, während stromgeführte Wärmepumpen in den Regionen mit wenig Mehrfamilienhäusern einen größeren Einfluss auf die Lastprofile haben werden.

Die strukturellen Unterschiede führen nicht nur zu Unterschieden in den vorhandenen Versorgungstechnologien, sondern auch zu Unterschieden in der erneuerbaren Erzeugung.

Beispielsweise ist der Anteil der PV-Erzeugung besonders hoch in Regionen mit einem hohen Anteil an Einfamilienhäusern, da Dachanlagen in der Vergangenheit hauptsächlich auf Einfamilienhäusern installiert wurden. Die Korrelation zwischen dem Anteil der Einfamilienhäuser und der installierten PV-Leistung ist in Abbildung 3 beispielhaft für die Landkreise in Bayern dargestellt.

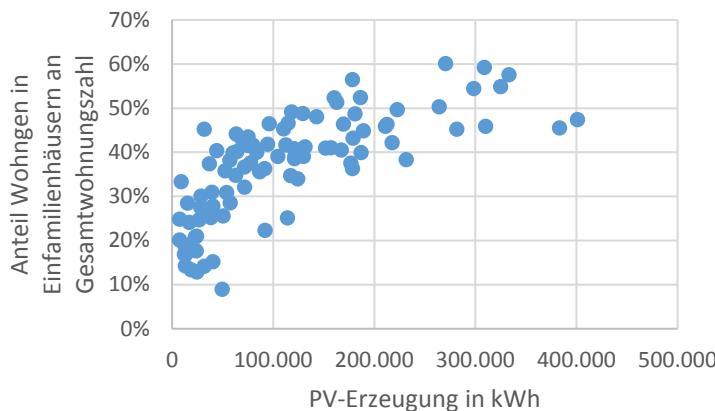


Abbildung 3: Korrelation zwischen erzeugter PV-Energie (Stand 2015) und dem Anteil an Einfamilienhäusern in bayrischen Landkreisen

Durch die geringere Bedarfsdichte sind Wohngebiete mit Einfamilienhäusern in der Regel nicht über Fernwärme versorgt. Daraus lässt sich schließen, dass die Potenziale der fernwärmebasierten Sektorenkopplung die PV-induzierten Probleme vor Ort zu lösen, in diesen Landkreisen geringer ausfallen.

5.2 Zukünftige regionale Entwicklung

In Abbildung 4 ist die relative Änderung des Wärme- und Strombedarfs in den Regionen dargestellt. Unter den getroffenen Annahmen zeigen sich deutliche Unterschiede in der Entwicklung einzelner Regionen. Pauschale Annahmen für alle Landkreise würden also zu abweichenden Ergebnissen für die zukünftige Entwicklung führen.

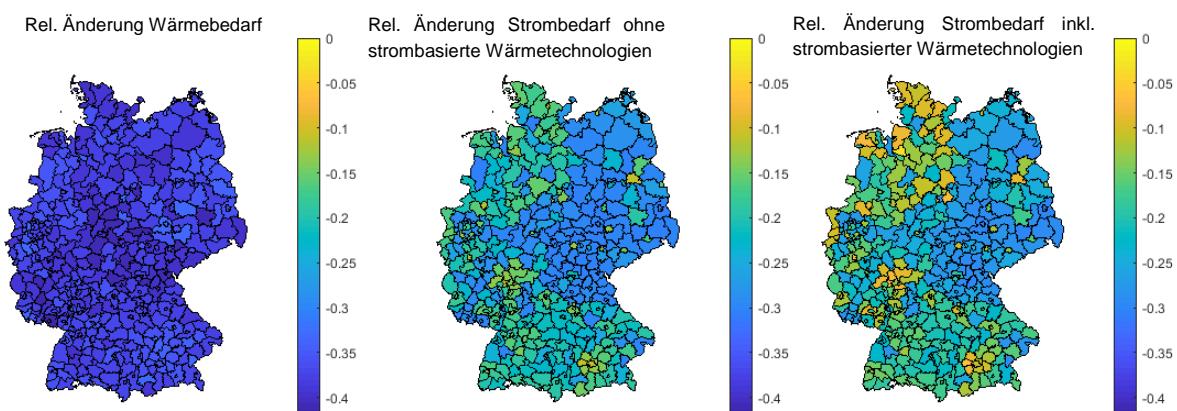


Abbildung 4: Relative Änderungen des Wärme- und Strombedarfs zwischen heutigen und zukünftigen Szenariowerten

Der Wärmebedarf nimmt in allen Regionen zwischen 32% und 43% ab (Abbildung links). Die Unterschiede sind einerseits zurückzuführen auf unterschiedliche Baualtersstrukturen in den Landkreisen. Andererseits führen unterschiedliche Anteile der einzelnen Sektoren, bei denen jeweils abweichende Reduktionen des Wärmebedarfs auftreten, zu Unterschieden in der Entwicklung der Landkreise.

Der Stromverbrauch in den Regionen nimmt durch Effizienzgewinne deutlich ab, wenn Wärm 技术 nicht dazu gerechnet werden (mittlere Abbildung). Gleichzeitig nehmen strombasierte Wärm 技术 wie Wärmepumpen zu. Deren zusätzlicher Stromverbrauch übersteigt jedoch unter den getroffenen Annahmen nicht die Effizienzgewinne, sodass in allen Landkreisen eine Abnahme des Strombedarfs zwischen 7 und 32% zu verzeichnen ist (Abbildung rechts). Je höher der Anteil der über Fernwärmennetze versorgten Gebiete ist (vgl. Abbildung 2), desto geringer ist die Zunahme des Stromverbrauchs durch Wärmepumpen, da Wärmepumpen unter den im Szenario getroffenen Annahmen vor allem dezentral in Haushalten eingesetzt werden.

Gleichzeitig zeigen sich nur geringe Änderungen an den im vorherigen Abschnitt identifizierten strukturellen Unterschieden. Landkreise, die zuvor einen hohen Anteil an FernwärmeverSORGUNG aufwiesen, werden weiterhin hauptsächlich über Fernwärme versorgt, sodass die vorher getroffenen Aussagen zur Technologieverteilung auch unter zukünftigen Annahmen gültig sind.

5.3 Residuallast

Abbildung 5 zeigt die Jahresdauerlinien der Residuallast als Differenz aus Verbrauch und erneuerbarer Erzeugung in den einzelnen Landkreisen (links) und für Deutschland (rechts). Eine hohe negative Residuallast fällt dabei insbesondere in den Landkreisen an, in denen Offshore-Windenergie eingespeist wird.

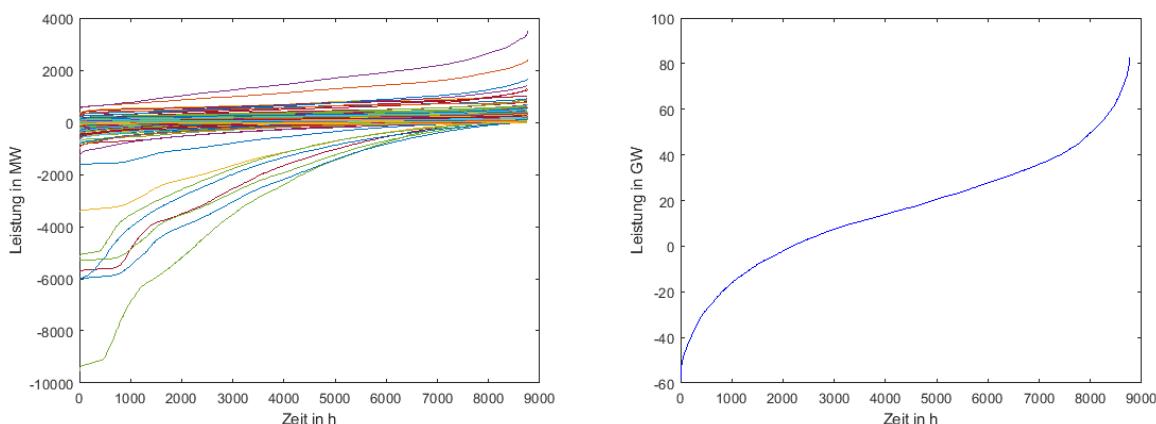


Abbildung 5: Jahresdauerlinien der Residuallast

In Abbildung 6 ist die Anzahl der Stunden eines Jahres mit negativer Residuallast dargestellt. Auffällig ist, dass insbesondere im Norden und Nordosten Landkreise mit einem hohen Anteil an Stunden mit negativer Residuallast auftreten. Dabei spielt neben der erneuerbaren Erzeugung auch die Last in der Region eine Rolle. Folglich weisen sowohl dünn besiedelte Regionen, als auch Regionen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Stromerzeugung, eine hohe Anzahl negativer Stunden auf.

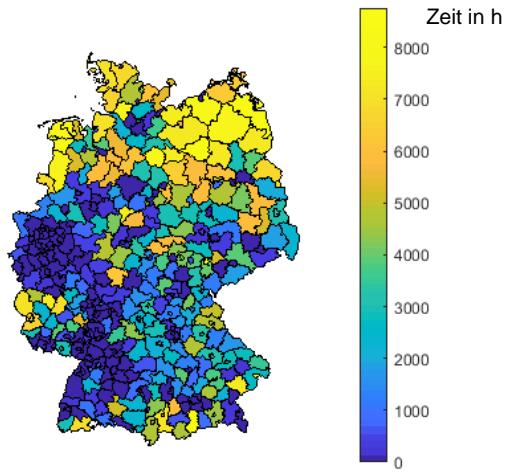


Abbildung 6: Anteil der Zeiten mit negativer Residuallast während eines Jahres

Die Landkreise wurden hierbei als Inseln betrachtet, sodass kein Ausgleich zwischen benachbarten Regionen stattfindet. In der Realität findet ein Ausgleich über das Stromnetz statt. Die regionale Analyse gibt jedoch Hinweise, welche Energiemengen in welche Richtungen über die Netze transportiert werden müssen. Zudem kann in der Folge untersucht werden, welche Ungleichgewichte schon vor Ort in den Regionen ausgeglichen werden können und so nicht mehr über die Netze transportiert werden müssen.

5.4 Einbindung von Ausgleichstechnologien

Zur ersten Abschätzung der maximal im Wärmesektor nutzbaren Strommenge wurde der stündliche negative Residuallastgang mit dem Wärmelastgang abgeglichen und die negative Residuallast als vollständig in Wärme umgewandelt betrachtet, falls der Wärmebedarf den Betrag der negativen Residuallast im jeweiligen Zeitschritt übersteigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 als die nach dem Ausgleich verbleibenden Stunden des Jahres mit negativer Residuallast dargestellt. In einigen Landkreisen im Norden reicht der Wärmebedarf nicht während aller Stunden des Jahres aus, um die negative Residuallast auszugleichen. Im Großteil der Landkreise übersteigt der regionale Wärmebedarf jedoch zu jedem Zeitpunkt die Höhe der negativen Residuallast.

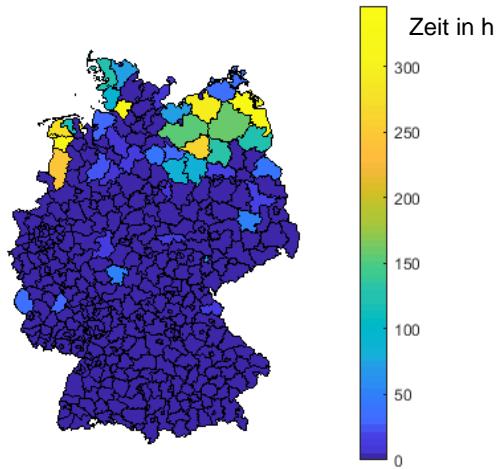


Abbildung 7: Stunden mit negativer Residuallast während eines Jahres nach Ausgleich durch PtH-Technologien, die die gesamte Wärmelast im jeweiligen Landkreis nutzen

Somit wäre es grundsätzlich möglich, wenn entsprechende Technologien und Regelungen installiert sind, den den Bedarf übersteigenden Strom in jedem Landkreis vollständig in Wärme umzuwandeln. Dies würde jedoch voraussetzen, dass flächendeckend strombasierte Wärmetechniken installiert und mit dem Ziel der Residuallastminimierung gesteuert werden. In der Realität treten weitere technische Restriktionen auf, die eine vollständige Verschiebung der Wärmelast begrenzen.

Am Beispiel des Landkreises Straubing-Bogen wird eine weitergehende Analyse durchgeführt. In diesem Landkreis tritt im gewählten Szenario sowohl eine hohe PV-Erzeugung pro Einwohner, als auch mit einer Deckung von 16% des Wärmebedarfs durch Wärmepumpen, ein vergleichsweise relativ hoher Anteil an Wärmepumpen an der Wärmeversorgung auf.

Eine Analyse des Residuallastverlaufes zeigt, dass in diesem Landkreis im Jahresmittel die größte negative Residuallast um 11 Uhr auftritt. Daher wurde der Wärmepumpenlastgang dahingehend angepasst, dass um 11 Uhr ein um 50% erhöhter Strombedarf auftritt, während der Strombedarf in den nachfolgenden Stunden vermindert wird.

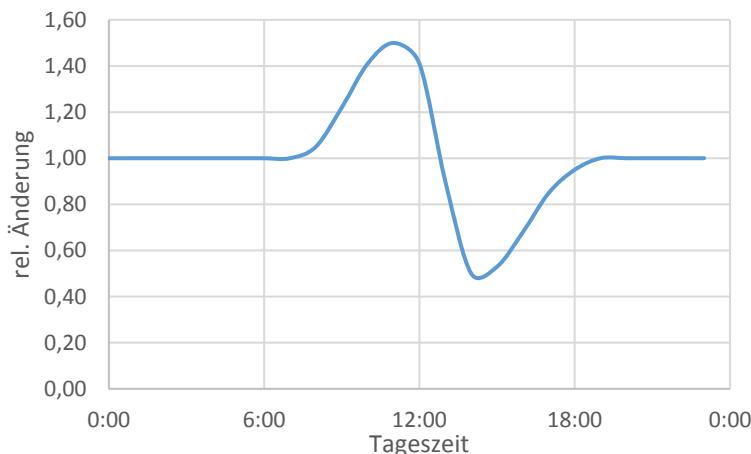


Abbildung 8: Relative Änderung des täglichen Wärmepumpenlastgangs

Werden die so veränderten Lastgänge in das Modell eingelesen, ergibt sich eine Änderung der minimalen Residuallast während des Jahres von -171 MW auf -167 MW. Um diese Änderung zu erzielen, müssten alle Wärmepumpen in der Region nach der regionalen Residuallast gesteuert werden. Dennoch ergibt sich nur eine vergleichsweise geringe Änderung der Residuallast.

In zukünftigen Untersuchungen soll der Einfluss von veränderten Lastgängen weitergehend untersucht werden. Dazu sollen durch detaillierte Simulationen von Siedlungen veränderte Eingangslastgänge erzeugt und die Auswirkungen auf die regionalen Lastgänge untersucht werden. In verschiedenen Szenarien können so die Auswirkungen verschiedener Regelungsweisen und Technologiezusammensetzungen untersucht werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe des Modell MELENA aus dem Projekt BAES können regionale Energieausgleichsbedarfe verdeutlicht werden. Da die Datenbasis aus dem Jahr 2010 für das Modell veraltet war, war eine Aktualisierung dieser Daten nötig, um weiterhin aktuell gültige Aussagen aus dem Modell ziehen zu können. Zudem bildete das bisherige Modell lediglich stromseitige Verbrauchs- und Erzeugungsstrukturen ab. In zukünftigen Energiesystemen wird jedoch die integrierte Betrachtung verschiedener Sektoren zunehmend wichtiger, um Synergieeffekte zu nutzen, eine Dekarbonisierung aller Sektoren zu erreichen und kosteneffiziente Lösungen für das Gesamtsystem zu identifizieren. Daher wurde die Datenbasis aktualisiert, regionale Unterschiede in der Entwicklung der Landkreise beachtet und zusätzlich der Wärmesektor bilanziert und in die Auswertung mit einbezogen.

Dazu war die Erhebung vieler aktueller Daten nötig sowie die Identifikation von Einflussfaktoren auf die Entwicklung des Wärme- und Strombedarfs, die in einen Verteilungsschlüssel zur Verteilung nationaler Annahmen auf die regionalen Ebenen eingeflossen sind.

Aus der Betrachtung der regionalen Energieerzeugung und der Technologieverteilung können Rückschlüsse gezogen werden, welche Technologien in welchen Regionen verstärkt vertreten sind und dies kann als Basis für eine Bestimmung regionaler Ausgleichspotenziale durch dezentrale Kopplungstechnologien dienen. Die Ergebnisse der Analyse regionaler Residuallasten zeigen weiterhin, zwischen welchen Regionen ein besonders hoher Energieausgleich entsteht. Diese Informationen können die Grundlage für Untersuchungen künftiger Belastungen in den Stromnetzen bilden, welche den regionalen Ausgleich zu einem großen Anteil leisten müssen.

In Zukunft soll die Datenbasis ausgeweitet werden. Bisher lag ein Fokus auf der detaillierten Erfassung des Wohn- und GHD-Sektors. Zukünftig ist auch eine detailliertere Erfassung des Industriesektors mit einer Unterscheidung der einzelnen industriellen Branchen sinnvoll, da diese durch unterschiedliche Abwärmepotenziale und unterschiedliche Temperaturniveaus sehr unterschiedliche Potenziale für die Kopplung von Wärme- und Stromsektor bieten.

Mithilfe von Sensitivitätsanalysen soll untersucht werden, welche der Charakteristika von Verbrauchern wichtige Einflussgrößen des regionalen Wärme- und Strombedarfs sind. Die Ergebnisse können als Grundlage für die Definition von Zukunftsszenarien dienen, welche die

Untersuchung von Entwicklungen der Verbrauchsstrukturen zum Schwerpunkt haben. Mit dem Ansatz der regionalen Residuallasten können die Auswirkungen des Einsatzes zentraler und dezentraler Technologien untersucht werden, indem statt der bisherigen Standardlastprofile veränderte Lastprofile, die den Einsatz der Technologien beinhalten, verwendet werden. Diese veränderten Lastgänge sollen zukünftig durch Simulationen regionalspezifisch erstellt und in das Gesamtmodell eingelesen werden. Dabei können auch Einflüsse verschiedener Regelungstrategien berücksichtigt werden.

7 Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0324027A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

8 Literaturverzeichnis

Agora Energiewende (Hg.) (2014): Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Erstellt im Auftrag von Agora Energiewende. Fraunhofer IWES, Stiftung Umweltenergierecht, Fraunhofer IFAM.

Appelhans, Kirsten; Exner, Stephan; Bracke, Rolf (2014): Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes.

Atzberger, Marco; Sauerwein, Simone; Chini, Benjamin; Stähler, Lena (2015): Energieeffizienz im Einzelhandel. Analyse des Gebäudebestands und seiner energetischen Situation. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH dena. Berlin.

Bayer, Gerhard; Sturm, Thomas; Hinterseer, Simon (2011): Kennzahlen zum Energieverbrauch in Dienstleistungsgebäuden. ÖGUT. Wien.

BBSR (2015): Wachsen und Schrumpfen von Kreisen und Kreisregionen im Zeitintervall 2010 bis 2015 im bundesweiten Vergleich. Online verfügbar unter <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/wachsend-schrumpfend-kreise/downloads.html;jsessionid=879D3356EA3BF02032BC971000504893.live21303>.

BDEW (Hg.) (2015): Wie heizt Deutschland? BDEW-Studie zum Heizungsmarkt. Berlin.

BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.; VKU; GEODE (Hg.) (2015): BDEW/VKU/GEODE-Leitfaden. Abwicklung von Standardlastprofilen Gas.

Bundesagentur für Arbeit (2017): Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte nach Wirtschaftsabteilungen und -gruppen der WZ 2008. Nürnberg.

Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW) (Hg.) (2007): Praxisinformation P 1007/13. Gastransport/Betriebswirtschaft. Abwicklung von Standardlastprofilen.

Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS): EnergyMap. Online verfügbar unter www.energymap.info.

Fraunhofer UMSICHT; Fraunhofer IOSB/AST (2013): Modellbasierte, regional aufgelöste Analyse des Bedarfs an netzgekoppelten elektrischen Energiespeichern zum Ausgleich fluktuierender Energien.

Fraunhofer UMSICHT; Fraunhofer IOSB-AST (2017): Abschlussbericht: Bedarfsanalyse Energiespeicher 2 - Auswirkungen der räumlichen Verteilung von Anlagen zur Stromerzeugung und Bewertung von Energieausgleichstechnologien. Oberhausen/Ilmenau.

Henger, Ralph; Deschermeier, Philipp; Hude, Marcel; Seipelt, Björn; Voigtländer, Michael (2016): Energieeffizienz bei Büroimmobilien. dena-Analyse über den Gebäudebestand und seine energetische Situation. Hg. v. dena. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin/Köln.

Henger, Ralph; Hude, Marcel; Seipelt, Björn; Toschka, Alexandra; Scheunemann, Helge; Barthauer, Matthias; Giesemann, Christian (2017): Büroimmobilien. Energetischer Zustand und Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin.

Lund, Henrik; Østergaard, Poul Alberg; Connolly, David; Mathiesen, Brian Vad (2017): Smart energy and smart energy systems. In: *Energy*. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.123.

Meier, Hermann; Füngfeld, Christian; Adam, Thomas; Schieferdecker, Bernd (1999): Repräsentative VDEW-Lastprofile. VDEW; BTU Cottbus. Frankfurt am Main.

Neiber, Josef (2014): Energieeffizienz in der Landwirtschaft. Von der Theorie zur Praxis - Energieverbrauchsmessungen an landwirtschaftlichen Betrieben. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft LfL, 2014.

Pezzuto, Simon; Zambotti, Stefano; Croce, Silvia; Zambelli, Pietro; Garegnani, Giulia; Scaramuzzino, Chiara et al. (2018): Open Data Set for the EU28. Hotmaps Project, D2.3 WP2 Report. Online verfügbar unter www.hotmaps-project.eu.

Schlomann, Barbara; Wohlfarth, Katharina; Kleeberger, Lukas Hardi; Geiger, Bernd; Pich, Antje; Gruber, Edelgard et al. (2015): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013. Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Fraunhofer ISI; Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München; GfK Retail and Technology GmbH; IREES GmbH.

Scholz, Yvonne (2012): Renewable energy based electricity supply at low costs. Development of the REMix model and application for Europe. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.

Schulz, R.; Suchi, E.; Öhlschläger, D.; Dittmann, J.; Knopf, S.; Müller, C. (2013): Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. Endbericht. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hg.): Regionaldatenbank Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.regionalstatistik.de/>.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder: Zensusdatenbank. Zensus 2011. Online verfügbar unter <https://ergebnisse.zensus2011.de/>.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2010): Verzeichnis der Krankenhäuser und Vorsorge- oder Rehabilitationseinrichtungen (Krankenhausverzeichnis). Wiesbaden.

Stieß, Immanuel; Fischer, Corinna; Kresse, Sarah (2017): Power efficiency classes for households - monitoring long-term effects of a power saving intervention. In: eceee Summer Study. Presqu'île de Giens, Frankreich, 29. Mai - 03. Juni, S. 2139–2148.

Tippkötter, Rainer; Schüwer, Dietmar; Wallschlag, Benedikt (2009): Leitfaden Energieeffizienz für Krankenhäuser.

VDE (2015): Potenziale für Strom im Wärmemarkt bis 2050. Wärmeversorgung in flexiblen Energieversorgungssystemen mit hohen Anteilen an erneuerbaren Energien. Energietechnische Gesellschaft im VDE.

Voss, Karsten; Soara Bernard (2015): Energieverbrauch und Energieeffizienz in der Hotellerie. In: *hotel+energie* August 2015, S. 4–7.

Walberg, Dietmar; Holz, Astrid; Gniechwitz, Timo; Schulze, Torsten (2011): Wohnungsbau in Deutschland - 2011 - Modernisierung oder Bestandsersatz. Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen "Kleinen Wohnungsbaus". Kiel: Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen ARGUE (Bauforschungsbericht, 59).

Wieland, Daniela (2018): Entwicklung eines Verteilungsschlüssels für Versorgungstechnologien basierend auf der regionalen Entwicklung des Wärme- und Stromsektors. Bachelorarbeit. Ruhr-Universität Bochum.