

# BEITRAG VON WÄRMEPUMPENSYSTEMEN UND WÄRMESPEICHERN ZUR INTEGRATION ERNEUERBARER ENERGIEN

Inken Knop M.Sc.(\*), P. Dubucq M.Sc., Prof. Dr.-Ing. G. Ackermann

Institut für Elektrische Energiesysteme und Automation, Technische Universität Hamburg-Harburg, Eißendorfer Straße 38, 21073 Hamburg., +49 176 5689 0707, inken.knop@mailbox.org; <http://www.tu-harburg.de/ha/>

**Kurzfassung:** Im folgenden Beitrag wird die verstärkte Nutzung von Luftwärmepumpen und sensiblen Wärmespeichern sowie deren Auswirkungen auf die Integrationsmöglichkeiten von volatil erzeugter, erneuerbarer Energie in das Energiesystem der Hansestadt Hamburg beschrieben. Dazu werden die Veränderungen des Strom- und Wärmebedarfs der Stadt mit den hieraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen für verschiedene Szenarien einer zukünftigen Energieversorgung mittels einer Modellbildung und Simulation untersucht. Darauf aufbauend werden im Detail das Potenzial zur Verschiebung der durch die Wärmepumpen genutzten Leistung und die durch den Einsatz verschiedener Wärmespeicher verschiebbare Energie betrachtet. Weiterhin wird analysiert wie stark der nutzbare Anteil fluktuierender Erzeugung durch diese Verschiebung der Last erhöht werden kann.

**Keywords:** Demand Side Management, Power-to-Heat, Wärmepumpe, Wärmespeicher, Regelleistung, Modelica,

## 1 Einleitung

Zukünftig soll ein großer Anteil der deutschen Stromversorgung durch erneuerbare Energien erzeugt werden [1]. Hierbei kommt besonders den volatilen Energiequellen Wind- und Solarenergie eine große Bedeutung zu. Die daraus resultierende Dargebotsabhängigkeit in der Energieerzeugung birgt die Notwendigkeit der Flexibilisierung des Stromversorgungssystems und der Stromnachfrage. Eine Möglichkeit zur Anpassung des Verbrauchs an die Erzeugung stellt die Speicherung dar. Dabei ist besonders die Umwandlung in Wärme und die Wärmespeicherung verhältnismäßig kostengünstig und technisch einfach realisierbar (Power-to-Heat). Eine effiziente Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie kann mittels Wärmepumpen geschehen. Diese Art der Wärmeerzeugung stellt eine thermodynamisch sinnvolle Alternative zur direkten Wärmeerzeugung aus fossilen Energieträgern dar. Hierbei können sowohl kleine Wärmepumpen in Haushalten als auch große Wärmepumpen in Nah- und Fernwärmenetzen zur Flexibilisierung des Energieverbrauchs dienen und damit als Form des Demand Side Managements (DSM) die Integration der volatilen Energiequellen verbessern. Als Speicher fungieren kleine, dezentrale Warmwasserspeicher in Haushalten mit Wärmepumpen und die Wärmespeicherkapazität der beheizten Gebäude. In Nah- und Fernwärmesystemen bieten weiterhin die vorhandenen Wassermassen, sowie zusätzlich am Fernwärmenetz installierte Warmwasserspeicher große Potenziale zur Energiespeicherung.

Im Folgenden wird der Einfluss einer zukünftigen verstärkten Nutzung von Haushaltswärmepumpen mit sensiblen Warmwasserspeichern in der Hansestadt Hamburg auf die aus der Energieversorgung resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen und auf die Integrationsmöglichkeiten der Energie aus erneuerbaren Quellen untersucht.

## 2 Methodik

Die Simulation der zukünftigen, verstärkten Nutzung von Haushaltswärmepumpen in Hamburg wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens *Transient.EE - Transientes Verhalten gekoppelter Energienetze mit hohem Anteil Erneuerbarer Energien* untersucht [2]. Dieses Forschungsvorhaben verfolgt das Ziel Möglichkeiten zur effizienten Integration von erneuerbaren Energien zu untersuchen, die sich aus der gekoppelten Betrachtungsweise von Strom-, Wärme- und Gasversorgungssystem ergeben. Mittels einer Simulation, die alle relevanten Komponenten dieses gekoppelten Systems berücksichtigt, soll ein ganzheitliches Konzept zur Optimierung der Energieversorgung erarbeitet werden.

Zur Simulation verschiedener zukünftiger Energieversorgungsszenarien wird im Rahmen des Projekts eine Modelica Bibliothek erstellt, die nach Projektende unter der Modelica Lizenz veröffentlicht wird [3]. Für die hier durchgeführte Untersuchung werden als neuer Teil der Bibliothek Modelle für eine Luftwärmepumpe, einen sensiblen Wärmespeicher und einen wärmeverbrauchenden Haushalt entwickelt und mittels Literaturdaten validiert. Weiterhin werden Rahmenbedingungen für verschiedene Energieversorgungsszenarien definiert. Im Folgenden wird auf die Szenarien mit einem maximalen Zubau von Luftwärmepumpen in Einfamilienhäusern im Vergleich zur Nutzung von Erdgasthermen unter unterschiedlichen Ausbauzuständen der erneuerbaren Energien eingegangen.

Für die Berechnung der Veränderung der Emissionen werden zunächst der zukünftige Gesamtwärme- und strombedarf für die verschiedenen Zieljahre berechnet. In der vorliegenden Untersuchung wird der Wärmebedarf der Privathaushalte neu bestimmt. Der Wärmebedarf der Industrie und des Gewerbe/Handel/Dienstleistungs-Sektors wird als unverändert gegenüber dem Referenzjahr 2012 angenommen. Für den hier näher untersuchten Wärmebedarf der bereits bestehenden Haushalte werden für je einen unterschiedlich großen Anteil aller Wohngebäude entweder eine Verbesserung des Isolationsstandards durch Sanierungen oder der Abriss und Wiederaufbau berücksichtigt. Außerdem wird der Neubau von Wohngebäuden aufgrund eines nach [4] angenommenen Bevölkerungswachstums der Stadt Hamburg berücksichtigt. Als weiteres Ziel wird der veränderte Strombedarf der gesamten Stadt aufgrund der hinzukommenden Wärmepumpen im Vergleich zur Nutzung von Gasthermen bestimmt und hierbei detailliert auf den zeitlichen Verlauf des zusätzlichen Strombedarfs ohne eine seitens der Übertragungsnetzbetreiber durchgeführte, gezielte Regelung der Wärmepumpen eingegangen.

Aufbauend auf den veränderten Energiebedarfsprofilen wird mittels des in [5] beschriebenen Modells der Einsatz der Strom- und Fernwärmeerzeuger simuliert. Aus dem Einsatz fossiler Kraftwerke ergeben sich die veränderten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Es werden die unterschiedlichen Ausbauzustände der erneuerbaren Energien (2034 und 2050) und der Einsatz von Wärmepumpen in Einfamilienhäusern mit einem Szenario ohne forcierten Ausbau der Wärmepumpen und stattdessen einer Nutzung von Gasthermen verglichen. Abschließend wird untersucht wie groß das Potenzial aller Wärmepumpen und Wärmespeicher innerhalb

eines virtuellen Kraftwerks zur Verschiebung von Leistung und Energie im Vergleich zu einem geplanten Dampfkraftwerk mit Großwärmespeicher [6] ist.

### 3 Modellierung und Datengrundlage

Zunächst werden Modelle einer Wärmepumpe, verschiedener Gebäude und eines Warmwasserspeichers in der Sprache Modelica, welche in der Simulationsumgebung Dymola genutzt wurde, erzeugt. Das Modell der Hamburger Energieversorgung besteht aus der Abbildung der elektrischen Energieerzeugung und des Verbrauchs, sowie der Erzeugung und des Verbrauchs der Wärme werden aus dem Projekt Transient.EE [2] genutzt. Im Folgenden werden kurz die grundlegenden Eigenschaften der Modelle vorgestellt. Die Validierung der Modelle findet sich in [7].

#### 3.1 Wärmepumpe

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden nur Luftwärmepumpen mit variabler Drehzahlregelung des Verdichters abgebildet. Der Anteil der Luftwärmepumpen im Vergleich zu den Haushaltswärmepumpen mit anderen Wärmequellen stieg in den letzten Jahren deutlich und macht aktuell mehr als die Hälfte aller verkauften Wärmepumpen aus. Dabei liegt besonders der Anteil der Luftwärmepumpen bei Sanierungen deutschlandweit deutlich höher als die Nutzung anderer Wärmequellen [8]. Ein weiterer Grund für die Beschränkung auf Luftwärmepumpen liegt in der Einschränkung der Untersuchung auf die Stadt Hamburg. Da der Einsatz von Luftwärmepumpen keine großen Gartenflächen oder tiefe Bohrungen erfordert, ist ihre Nutzung in Städten besonders ausgeprägt. Insgesamt haben Luftwärmepumpen eine typischerweise geringere Jahresarbeitszahl (JAZ). Deshalb führt die Annahme, dass nur Luftwärmepumpen eingesetzt werden tendenziell eher zu einem überschätzten Strombedarf und damit zu höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen als dies der Fall beim Einsatz von Wärmepumpen mit Erdwärme oder Grundwasser als Wärmequelle wäre. Die Berechnung der erforderlichen elektrischen Leistung bei vorgegebener Außen- und Innenraumsolltemperatur geschieht mittels der Leistungsbilanz mit der Carnot-Leistungszahl und einem Wirkungsgrad  $\eta$  zur Berücksichtigung der Irreversibilitäten. Das Produkt aus Carnot-Leistungszahl und Wirkungsgrad ergibt den Coefficient-of-Performance (COP) der Wärmepumpe.

$$\text{COP} = \frac{T_{\text{emit}}}{T_{\text{emit}} - T_{\text{amb}}} \cdot \eta = \frac{\dot{Q}_{\text{ab}}}{P_{\text{el}}} \quad (1)$$

Dabei bezeichnen  $T_{\text{amb}}$  und  $T_{\text{emit}}$  die Umgebungstemperatur und die Temperatur der Wärmenutzung.  $\dot{Q}_{\text{ab}}$  und  $P_{\text{el}}$  sind die Nutzwärme und die elektrische Leistung zum Antrieb des Verdichters. Durch Integration der benötigten elektrischen Leistung und der erzeugten thermischen Leistung über das gesamte Jahr entsteht die JAZ, welche zur Bewertung von Wärmepumpen herangezogen wird.

### 3.2 Wärmespeicher

Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein sensibler Wärmespeicher mit Rohrbündelwärmeübertragern nachgebildet. Das verwendete Speichermedium ist Wasser. Zur Abbildung der Wärmeübergänge von den Wasserströmen der Wärmepumpe zum Speichertank, vom Speichertank zum Heizwasserkreislauf wurde und vom Speichertank zum Brauchwasserkreislauf wird die Nußelt-Zahl für eine turbulente Rohrströmung mit konstanter Wandtemperatur und  $Pr \approx 1$  nach [9] mit Formel (2) berechnet.

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/2} \quad (2)$$

In der Modellierung des Speichers werden Druckverluste bei den Rohrströmungen, sowie ein Wärmeverlust gegenüber der Aufstellungsumgebung des Speichers abgebildet. Entsprechend der beheizten Wohnfläche werden unterschiedlich große Wärmespeicher (200, 300, oder 500 l Speichervolumen) eingesetzt. Die typische Sollwert-Temperatur des Speichers beträgt 45 °C, die Umgebungstemperatur 18 °C. Die Speichertemperatur ist ausreichend zur Erwärmung des Massenstroms für die Versorgung der Fußbodenheizung. Für die Brauchwassernutzung wird der benötigte Massenstrom erst durch den Wärmespeicher erhitzt und dann aufgrund der Legionellen-Problematik mittels eines elektrischen Widerstands auf 65 °C nachgeheizt. Die elektrische Erwärmung erfolgt im Modell dabei ideal mit einem Wirkungsgrad von 100 %.

### 3.3 Gebäude

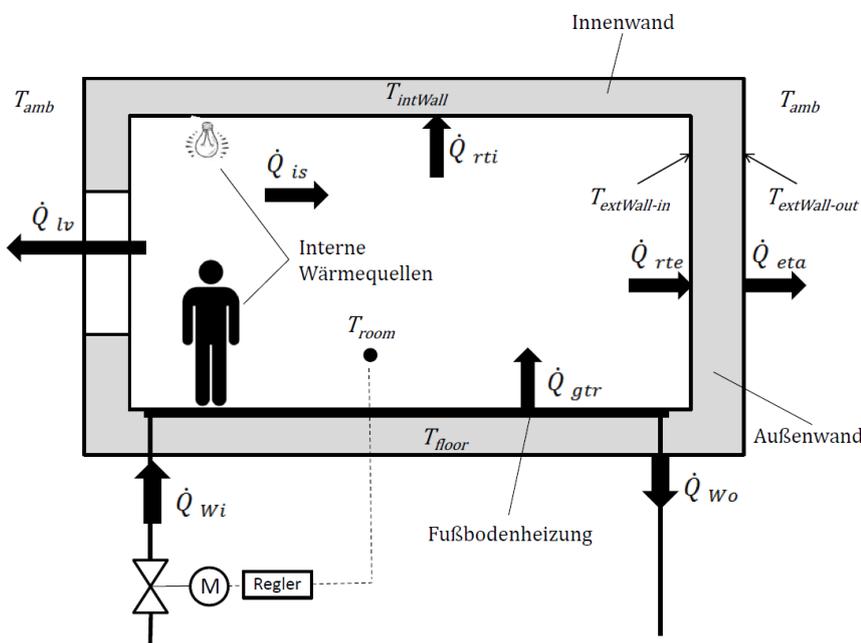


Abbildung 1: Darstellung der Wärmeströme zur Berechnung der Raumtemperatur

Bei den simulierten Gebäuden handelt es sich um verschiedene Wohngebäude in Anlehnung an die Energieeinsparverordnung [10]. Ihr Wärmebedarf teilt sich in den Raumwärmebedarf und den Wärmebedarf zur Brauchwassererwärmung auf. Der Energiebedarf zur Raumwärmebereitstellung wird von der Größe der beheizten Fläche, dem Isolationsstandard des Gebäudes und dem Wirkungsgrad des Heizsystems bestimmt. Der Energiebedarf für die Brauchwassererwärmung ist von der

Anzahl der Personen abhängig. Hierfür wurde als Mittelwert aus [11, 12] ein Nutzwärmebedarf von 450 kWh/(Person a) angenommen. Die Berechnung der Wärmeverluste eines Gebäudes und der daraus resultierenden Norm-Heizlast erfolgt nach DIN EN 12831. Darüber lässt sich die Auslegungsgröße einer Haushaltswärmepumpe bestimmen. Bei der Berechnung der Wärmeverluste werden Transmissionswärmeverluste und Lüftungswärmeverluste

berücksichtigt. Für die Auslegungs-Heizleistung der Wärmepumpen wird zu den Norm-Wärmeverlusten die Aufheizleistung addiert. Die Abbildung 1 zeigt schematisch alle berücksichtigten Wärmeströme.

### 3.4 Energieversorgung

Vereinfachend wird in der vorliegenden Untersuchung angenommen, dass, unabhängig von der realen lokal installierten elektrischen Leistung und dem tatsächlichen Lastfluss, die Aufteilung der installierten Leistung auf die verschiedenen Energieträger für Hamburg genauso wie für Gesamtdeutschland vorliegt und sich auch zukünftig gleich entwickeln wird. Die installierte Leistung wird mit Hilfe des Verhältnisses der Höchstlasten von Hamburg zu der von Deutschland von den Werten für Gesamtdeutschland auf die in Hamburg installierte Leistung skaliert. Daraus ergibt sich das in Tabelle 1 angegebene betrachtete Erzeugungssystem. Für das Szenariojahr 2034 wird der Ausbauplan nach dem Erneuerbare Energien Gesetz [1], sowie die Entwicklung des konventionellen Kraftwerkspark nach dem Netzentwicklungsplan [13] angenommen. Für 2050 wird angenommen, dass der konventionelle Kraftwerkspark identisch zu 2034 bleibt. Die regenerativen Energien werden nach den politischen Zielvorgaben der Bundesregierung weiter ausgebaut.

Tabelle 1: Abgebildete installierte Leistung in MW zur Stromversorgung des betrachteten Systems nach [1, 13, 14] und kraftwerksspezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen in g/kWh<sub>thermischer Energie</sub> und Wirkungsgrade in % nach [15]

	2012	2034	2050	CO <sub>2</sub> -Emissionen	Wirkungsgrad
Braunkohle und Kernenergie	890	291	291	403	34
Steinkohle	690	474	474	337	40
GuD	590	791	791	52	20
Gasturbinen	130	176	176	202	35
<b>Summe konventioneller Erzeuger</b>	<b>2.300</b>	<b>1.732</b>	<b>1.732</b>		
Pumpspeicherkraftwerke	170	276	276	0	-
Biomasse	160	283	322	0	-
Solarenergie	810	1.463	2.446	0	-
Onshore-Wind	760	1.770	2.753	0	-
Offshore-Wind	7	622	1.327	0	-
Laufwasser	110	123	123	0	-
<b>Summe regenerativer Erzeuger</b>	<b>2.017</b>	<b>2.537</b>	<b>7.247</b>		
<b>Gesamtsumme</b>	<b>4.317</b>	<b>6.269</b>	<b>8.979</b>		

Der zeitliche Verlauf der Stromerzeugung der volatilen Erzeugeranlagen resultiert aus historischen Einspeisedaten, die mit der jeweilig installierten Leistung skaliert werden. Die im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten Daten zum zeitlichen Verlauf stammen von den Übertragungsnetzbetreibern [16, 17] aus dem Jahr 2012. Zu den volatilen Energiequellen kommen die Heizkraftwerke zu der Hamburger Energieversorgung hinzu. Deren Fahrpläne und damit auch die von ihnen eingespeiste elektrische Leistung richten sich nach dem Wärmebedarf im Fernwärmenetz. Die endgültige Stromerzeugung berechnet sich durch das in [5] detailliert beschriebene Optimierungsverfahren.

Tabelle 2: Aufteilung der Wärmeerzeugung 2012 [18] und spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen in g/kWh [11, 19]

	Anteil in %	CO <sub>2</sub> -Emissionen
Erdgas	56	227
Fernwärme	22	327
Elektrische Energie	8	220
Erdöl	13	317
Sonstige	1	243

Die aus der Stromerzeugung resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnen sich aus der Summe der spezifischen Emissionen der zu jedem Zeitschritt betriebenen Kraftwerke. Dabei werden lediglich die CO<sub>2</sub>-Äquivalente aufgrund des Brennstoffes berücksichtigt. Die spezifischen Emissionen der elektrischen Energie berechnen sich aus der Multiplikation der Emissionen der thermischen Energie mit dem Wirkungsgrad (Tabelle 1). Die Wirkungsgrade der jeweiligen Kraftwerkstypen werden über das Jahr als konstant modelliert.

Die Wärmeversorgung der Stadt Hamburg wird im Vergleichsjahr 2012 in der vorliegenden Betrachtung wie in Tabelle 2 angegeben sichergestellt. Der Wärmebedarf resultiert aus Daten einer Untersuchung der Vattenfall Europe Wärme AG [20], in der der Wärmebedarf des Fernwärmebedarfs in Abhängigkeit der Außentemperatur betrachtet wurde. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Berechnung der Gesamtemissionen der Wärmeversorgung sind ebenfalls in Tabelle 2 angegeben.

## 4 Simulationsergebnisse

### 4.1 Veränderung des Gesamtwärmebedarfs

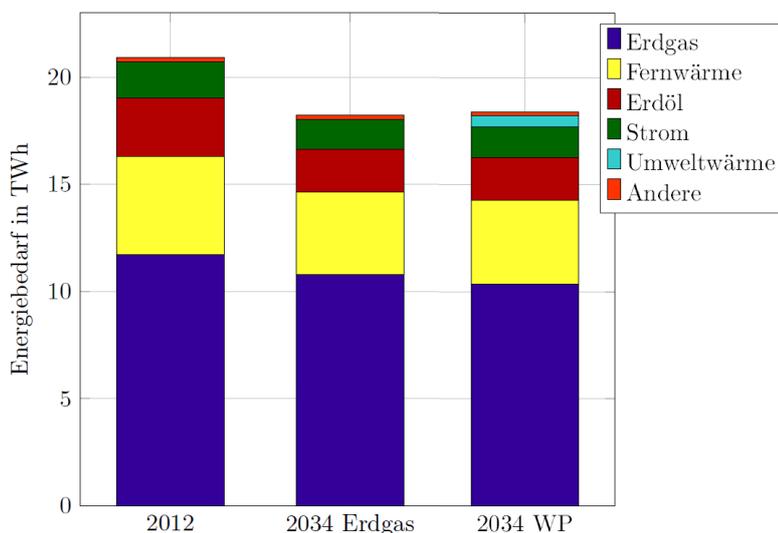


Abbildung 2: Zusammensetzung der Wärmebereitstellung in den untersuchten Szenarien

Der Gesamtwärmebedarf der Stadt Hamburg wird durch die beschriebenen Maßnahmen zur Energieeffizienz gegenüber dem Referenzjahr 2012 reduziert. Insgesamt kommt es bis zum Jahr 2034 mit den getroffenen Annahmen zu einer Verringerung des Energiebedarfs zu Heizzwecken und zur Brauchwassererwärmung im Bereich der Wohngebäude auf 87 % des Energiebedarfs von 2012 (vergleiche Abbildung 2). Im Basisgutachten zum Masterplan Klimaschutz für Hamburg [21]

wird im Referenzszenario eine Senkung des Heizenergiebedarfs von 2010 bis 2030 um 30 % für möglich erachtet. Das deutlich kleinere Senkungspotenzial in der vorliegenden Simulation ist vorrangig auf die Beschränkung auf Wohngebäude zurückzuführen.

Aus Mangel an Informationen über die 2012 installierte Anzahl an Wärmepumpen in Hamburg wird vereinfachend der Anteil an Umweltwärme vernachlässigt. Entsprechend dem Szenario mit Wärmepumpenzubau steigt der Anteil der Umweltwärme am Gesamtwärmebedarf auf 2,8 % bei Wärmepumpenzubau. Diese Anteile würden sich bei der Verwendung von Erdwärme-Wärmepumpen oder Grundwasser-Wärmepumpen anstelle von Luftwärmepumpen aufgrund der typischerweise höheren JAZ vergrößern. Als Konsequenz würde der Anteil der mittels elektrischer Energie bereitgestellten Wärmeenergie sinken. Bei deutlich verbesserten politischen Rahmenbedingungen für die Integration von Wärmepumpen in die Wärmeversorgung wird in [22] für 2030 prognostiziert, dass 59 TWh Umweltenergie zur Deckung des Gesamtwärmebedarfs Deutschlands beitragen. Bei nicht verbesserten politischen Rahmenbedingungen wird die Nutzung von 34,4 TWh Umweltenergie prognostiziert. Bei einem Gesamtwärmebedarf Deutschlands im Jahr 2030 nach [8] von ca. 972 TWh entspricht der Anteil der Umweltwärme für Gesamtdeutschland mit maximalem Wärmepumpenausbau nach [22] 6 % und bei nicht verbesserten Rahmenbedingungen 3,5 %. Die Vergleichswerte für den Anteil der Umweltwärme am Gesamtwärmebedarf des Bundesverbands Wärmepumpe liegen höher als die hier berechneten Werte. Dies liegt an der bereits beschriebenen Beschränkung auf Luftwärmepumpen und deren Einsatz in Einfamilienhäusern. Hinzu kommt die Annahme, dass der Anteil der Umweltwärme 2012 gleich Null ist und abschließend die Tatsache, dass nur der Wärmebedarf der Wohngebäude reduziert wurde. Damit ist die Menge der Umweltwärme einerseits niedrig eingeschätzt und andererseits der Gesamtwärmebedarf zu hoch eingeschätzt. Dies führt zu dem insgesamt geringeren hier berechneten Prozentsatz der Umweltwärme am Gesamtwärmebedarf.

## 4.2 Veränderung des Gesamtstrombedarfs

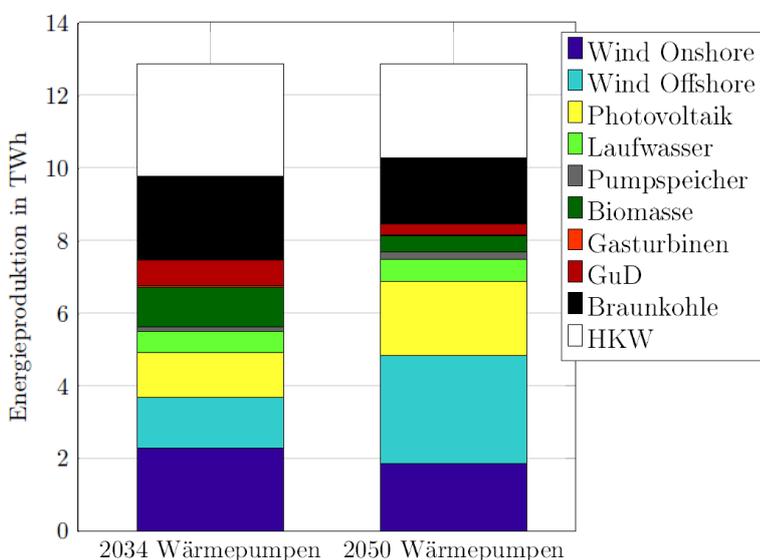


Abbildung 3: Struktur der Stromerzeugung in den untersuchten Szenarien

Prinzipiell besteht in beiden in Abbildung 3 dargestellten Szenarien eine Überschussproduktion durch regenerative Energien. Da diese nicht vollständig in Pumpspeicherkraftwerken gespeichert werden kann, wird in der vorliegenden Untersuchung davon ausgegangen, dass die Onshore-Windenergieanlagen abgeschaltet werden. Dies erklärt die im Vergleich zum Szenario mit dem Ausbaustand der regenerativen Energien auf 2034 geringe Energiemenge durch Onshore-Windenergie im Szenario 2050, trotz der dort größeren installierten

Leistung und der gleichen Wettersituation. Welche Anlagen in der Zukunft tatsächlich abgeschaltet würden (Onshore oder Offshore), ist aktuell schwierig vorhersehbar. Da jedoch in der folgenden CO<sub>2</sub>-Emissionsuntersuchung beide Anlagen mit Null CO<sub>2</sub>-Emissionen einspeisen, führt die Annahme, dass nur Onshore-Anlagen abgeschaltet werden, nicht zu

einer Verfälschung dieses Ergebnisses. Insgesamt sinkt der Anteil konventionell bereitgestellter Energie erwartungsgemäß mit dem Ausbau der regenerativen Energien. Unter den getroffenen Annahmen tragen die konventionellen Kraftwerke bei einem Ausbaustand der erneuerbaren Energien von 2034 noch zu 48 % der Stromproduktion der Stadt Hamburg bei und bei einem Ausbaustand von 2050 nur noch zu 37 %. Die im Vergleich zu den Zielen der Bundesregierung [1] recht hohen Werte ergeben sich dabei durch die fossil befeuerten Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, die zur Deckung des Fernwärmebedarfs in Betrieb sein müssen.

Der Vergleich zwischen dem zeitlichen Verlauf des Verbrauchs der elektrischen Energie durch die installierten Wärmepumpen und der Energieerzeugung durch Onshore Windenergieanlagen (beim Ausbaustand 2050), dargestellt in Abbildung 4, zeigt, dass zu gewissen Zeitpunkten des Jahres eine Divergenz zwischen den Verläufen vorliegt (gelb markierte Bereiche). In [23, 24] wird erläutert, dass an besonders kalten Tagen die mittlere Windgeschwindigkeit häufig unter dem Jahresdurchschnitt liegt. Der Grund hierfür liegt nach [24] in stabilen Hochdruckwetterlagen, die im Winter häufig besonders tiefe Temperaturen und sehr wenig Wind mit sich bringen. Diese Zeitpunkte können bei einer Nutzung von Strom zur Wärmeerzeugung und einer Stromversorgung, die zu großen Anteilen auf Windenergieanlagen beruht, zu Engpässen in der Energieversorgung führen.

Eine Möglichkeit zum Umgang mit diesen Situationen ist die vorherige Aufladung der Wärmespeicher bei noch hoher Windstromproduktion. Hierfür sind die Kenntnis der Wetterprognosen zur Außentemperatur und zur Windgeschwindigkeit sowie ein ausreichend großer Wärmespeicher notwendig.

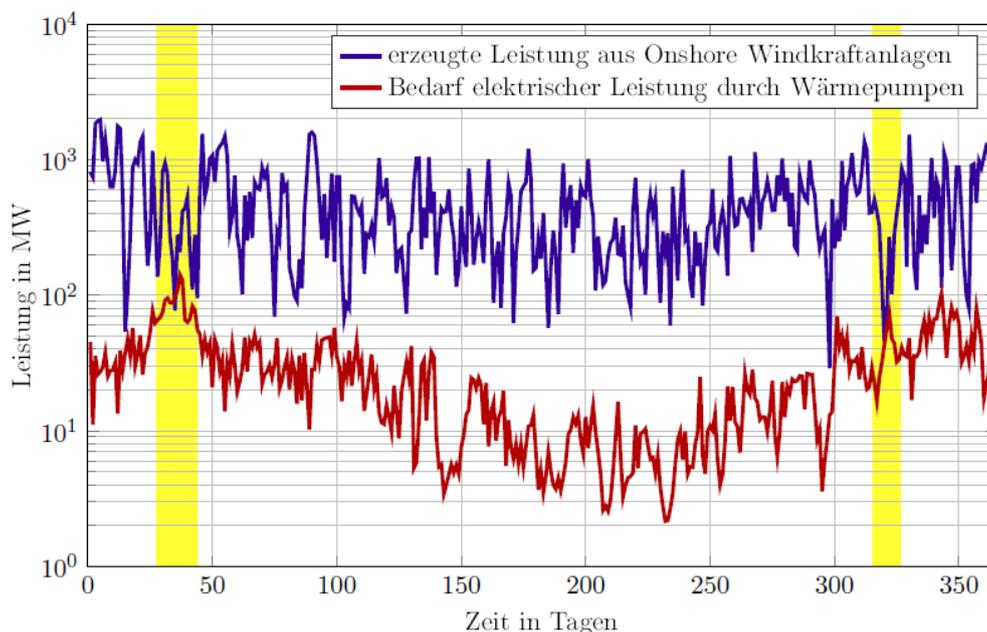


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf der Energieerzeugung durch Onshore-Windenergieanlagen und Energieverbrauch durch Luft-Wärmepumpen

### 4.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energiebereitstellung

Ohne Nutzung einer Speichersteuerung sind in diesen Perioden in denen gleichzeitig ein hoher Wärmebedarf und eine geringe Windeinspeisung vorliegen, zusätzliche konventionelle Kraftwerke erforderlich, um den gestiegenen Bedarf elektrischer Energie zu decken. Folglich liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesen Perioden deutlich über dem Jahresmittelwert. Für eine Abschätzung des tatsächlichen Potentials von Wärmepumpen zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist daher eine dynamische Simulation mit Hilfe des zeitlichen Verlaufs der Emissionsproduktion sinnvoll (vergleiche Abbildung 5).

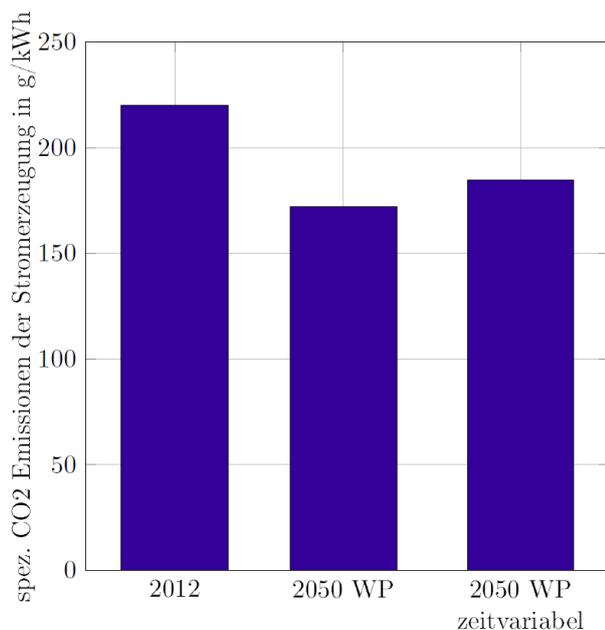


Abbildung 6: spezifische Emissionen der zur Wärmebereitstellung genutzten elektrischen Energie

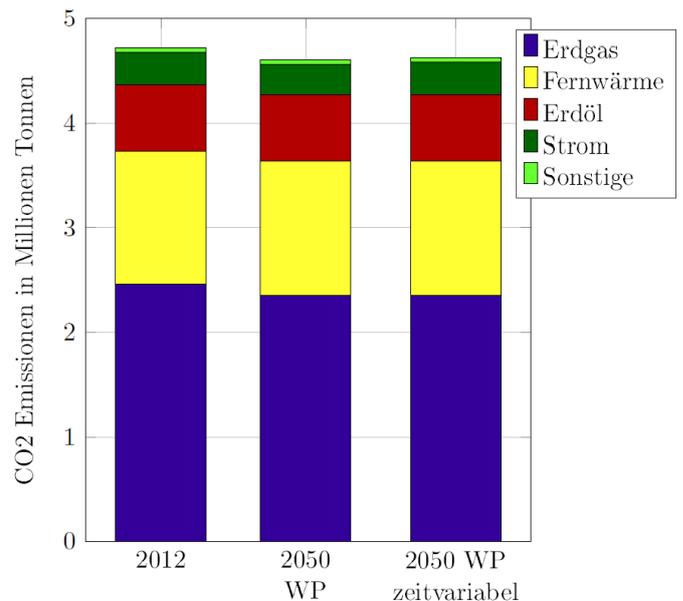


Abbildung 5: Gesamtemissionen der untersuchten Szenarien

Trotz der beschriebenen Perioden führt der Einsatz von Wärmepumpen in den betrachteten Szenarien zu verringerten Jahresemissionen. Bei einer Wärmebereitstellung wie im Referenzszenario angenommen, mit überwiegend Gasheizungen im Neubau und nach Sanierungen, liegen die Gesamtemissionen eines Jahres bei 4,723 Millionen Tonnen.

Die Reduzierung der Gesamtemissionen bei Annahme der über die gesamte Energieproduktion gemittelten spezifischen Emissionen des Strommix mit dem Ausbaustand der erneuerbaren Energien von 2050 beträgt im Vergleich zum Referenzszenario 2,5 %.

Bei der Annahme von spezifischen Emissionen zur Bereitstellung einer Kilowattstunde thermischer Energie aus Erdgas von 227 g/kWh und einer JAZ der Wärmepumpe von 3,4 senkt der Einsatz von Wärmepumpen die Gesamtemissionen der Wärmebereitstellung ab einem Emissionswert des Strommix von unter 770 g/kWh. Bei einer JAZ von 2,9 ist zur Emissionssenkung ein Wert der spezifischen Emissionen des Strommix von unter 658 g/kWh notwendig.

Damit reduzieren Wärmepumpen mit einer JAZ größer als 2,6 bereits seit 2012 mit dem damaligen Emissionswert von 576 g/kWh [25] die Gesamtemissionen durch die Nutzung von Umweltwärme an Stelle der Nutzung von 100 % konventionellen Brennstoffen.

#### 4.4 Potenzial zur Energie- und Leistungsverschiebung durch Speicher

Für die Nutzung von Wärmepumpen zur verbesserten Integration von erneuerbaren Energien in das Energieversorgungssystem ist ein ausschlaggebendes Merkmal die Anpassungsfähigkeit der Last an die volatile Erzeugung. Hierfür sind besonders die Wasserspeicher, aber auch die Temperaturträgheit der Gebäude entscheidend.

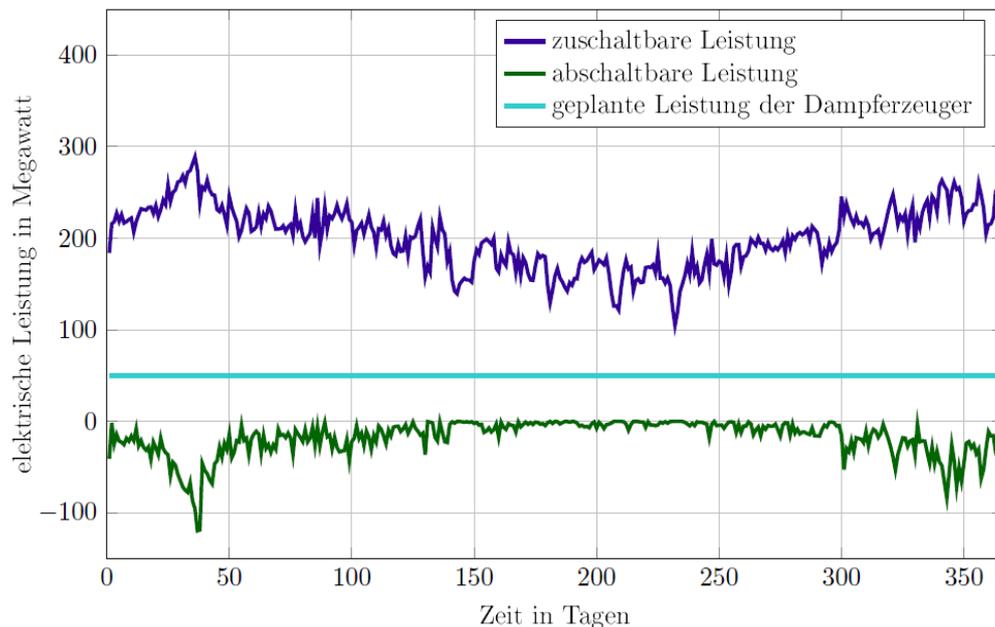


Abbildung 7: Jahresverlauf zur Verschiebung elektrischer Leistung

Im Jahresverlauf der Leistung ist zu erkennen, dass das Potenzial von Wärmepumpen zum DSM im Sommer deutlich geringer ist als im Winter. Die abschaltbare Leistung (positive Regelleistung) beträgt über den Sommer hinweg nahezu 0 MW. Auch wenn im Sommer prinzipiell die Möglichkeit des Anschaltens (negative Regelleistung) der Wärmepumpe und damit der Speicheraufladung gegeben ist, muss hier die sinnvolle Nutzung der Wärme sichergestellt sein. Da der Wärmespeicher bei hohen Temperaturen auch zur vollständigen Brauchwassererwärmung dienen kann, besteht auch im Sommer die Möglichkeit, in geringem Umfang Last zu verschieben. Während der besonders kalten Periode Ende Januar, Anfang Februar besteht die Möglichkeit sehr viel Leistung zu verschieben. Aufgrund der niedrigen Außentemperaturen ist der COP der Luftwärmepumpen zu diesem Zeitpunkt niedrig, so dass viel elektrische Energie zum Heizen benötigt wird. Deshalb ist trotz verhältnismäßig großer bereits genutzter (und damit abschaltbarer) Leistung immer noch eine zusätzliche Leistungsentnahme (negative Regelleistung) von fast 300 MW möglich.

Zum Vergleich dient in beiden Abbildungen der für das Hamburger Fernwärmenetz diskutierter Großwärmespeicher [6]. Dieser ist mit dreimal  $16.000 \text{ W/m}^3$ , entsprechend einer Gesamtkapazität von  $1.900 \text{ MWh}$  bei einer Nenntemperatur von  $99 \text{ }^\circ\text{C}$  dimensioniert und würde mit zwei Elektrodampferzeugern mit einer Leistung von je 25 MW und der Option auf Nachrüstung von zwei weiteren Dampferzeugern beheizt werden. Die bei maximalem Zubau von Wärmepumpen mit Speichern speicherbare thermische Energie in allen Haushalten entspricht etwas mehr als zwei Dritteln des Großwärmespeichers (das Speichervolumen aller installierten Wasserspeicher beträgt bei maximalem Ausbau der Wärmepumpen  $34.000 \text{ W/m}^3$ ). Da jedoch die Wärmepumpen nicht nur elektrische Energie in thermische

Energie umwandeln, sondern zusätzlich Energie aus der Umwelt nutzen, ist die speicherbare elektrische Energie deutlich geringer als die insgesamt geplante Speichermenge in Wedel.

Die geplante installierte elektrische (und damit auch thermische) Leistung der Elektrodampferzeuger ist jedoch geringer als die insgesamt installierte thermische Leistung der Wärmepumpen. Diese beträgt bei maximalem Ausbau 831,1 MW. Bei einem mittleren COP von 3,4 können damit 244,5 MW elektrische Leistung zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Damit kann der geplante Großwärmespeicher über einen längeren Zeitraum überschüssige Leistung aus Windstrom aufnehmen, jedoch keine so hohe maximale Leistung wie die maximale Anzahl Wärmepumpen.

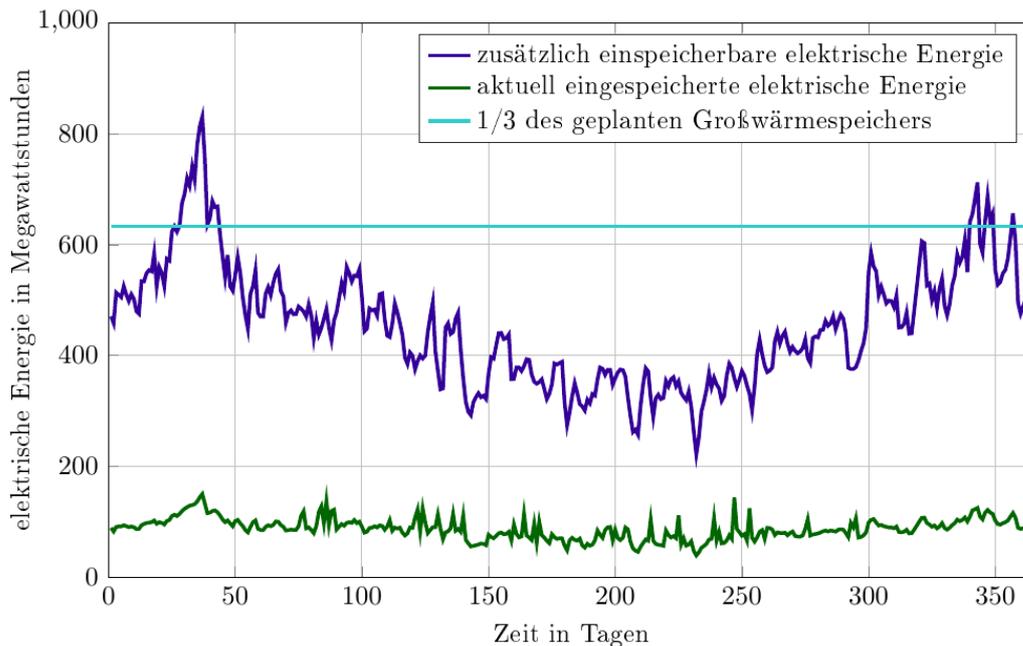


Abbildung 8: Potenzial zur Verschiebung von elektrischer Energie

Der Einsatz eines Großwärmespeichers mit Elektrodampferzeugern hat jedoch gegenüber der Nutzung vieler kleiner Haushaltswärmepumpen mit Warmwasserspeichern mehrere Nachteile. In erster Linie entfällt bei Elektrodampferzeugern die sinnvolle Nutzung von Umweltwärme, die mittels Wärmepumpen die benötigte elektrische Energie reduziert. Weiterhin muss die Wärme aus dem Großwärmespeicher mittels des Fernwärmenetzes zu den Verbrauchern transportiert werden. Dies ist mit Pumpstationen und damit weiterem Bedarf elektrischer Energie aufgrund des Druckverlustes im Fernwärmenetz und Wärmeverlusten in die Umgebung der Leitungen verbunden. Dies hat zur Folge, dass der Bedarf elektrischer Energie zur Deckung des thermischen Energiebedarfs bei der Nutzung eines Großwärmespeichers mit Elektrodampferzeuger höher ist als bei der Nutzung von Wärmepumpen. [26]

Insgesamt ist die Nutzung des Großwärmespeichers dann vorteilhaft, wenn sehr große Mengen überschüssiger elektrischer Energie vorhanden sind und die Größe der Wärmespeicher in den Haushalten aus Platzmangel nicht erhöht werden kann.

## 5 Kritische Betrachtung

Es handelt sich bei den betrachteten Szenarien eher um konservative Abschätzungen: Der Gesamtwärmebedarf ist prinzipiell etwas zu hoch eingeschätzt und hinzu kommt die Annahme, dass nur Luftwärmepumpen eingesetzt werden, sodass folglich auch der durch den Wärmepumpenzubau hinzukommende Strombedarf eher zu hoch berechnet wurde. Ebenfalls hieraus resultierend sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Bezug auf den Nutzen von Wärmepumpensystemen für die Energiewende konservativ berechnet. Für die Abschätzung des Potenzials zur Leistungs- und Energieverschiebung ist es schwierig eine pauschale Wertung vorzunehmen. Die niedrig abgeschätzte Gesamtanzahl von Speichern und Wärmepumpen unterschätzt das Potenzial, die Annahme von nur Luftwärmepumpen mit eher niedriger JAZ und großer Nennleistung überschätzt das Potenzial. Außerdem müssten für die tatsächliche Nutzung des Regelleistungspotenzials die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen einer Fernsteuerung im Poolverbund weiter untersucht werden.

## 6 Fazit und Ausblick

Abschließend lässt sich festhalten, dass Wärmepumpen zusammen mit Wärmespeichern in der Lage sind zukünftig die Emissionen der Energieversorgung zu reduzieren, sofern der Anteil erneuerbarer Energien wie im EEG geplant erhöht wird. Der Vergleich der Regelleistungspotenziale eines Großwärmespeichers im Fernwärmenetz auf der einen und der netzdienlichen Steuerung eines Pools aus Wärmepumpensystemen auf der anderen Seite zeigt, dass die Potenziale in der gleichen Größenordnung liegen, wobei die Annahmen für den Zubau an Wärmepumpen eher konservativ getroffen wurden. Im Rahmen des andauernden Projekts Transient.EE wird der Einfluss auf die Gesamtemissionen bei Nutzung dieses Verschiebepotenzials zur Optimierung des Gesamtsystems der Energieversorgung weiter untersucht.

## Literaturverzeichnis

- [1] Deutschland, Bundesregierung: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien: Erneuerbare-Energien-Gesetz
- [2] Andresen, L.; Dubucq, P.; Peniche Garcia, R. et. Al.: Status of the TransiEnt Library: Transient simulation of coupled energy networks with high share of renewable energy. In Proceedings of the 11th Modelica Conference, Paris 2015.
- [3] Modelica <https://www.modelica.org/libraries>
- [4] Delitz, Jürgen ; Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (Hrsg.): Bevölkerung in Hamburg 2013; Bevölkerungswachstum setzt sich fort. <http://www.statistik-nord.de/daten/bevoelkerung-und-gebiet/bevoelkerungsstand-und-entwicklung/dokumentenansicht/bevoelkerung-in-hamburg-2013>
- [5] Dubucq, P. ; Ackermann, G.: Frequency Control in Coupled Energy Systems with High Penetration of Renewable Energies. In International Conference on Clean Electric Power, Taormina, 2015. IEEE.
- [6] Erker, Martin ; Vattenfall Wärme Hamburg GmbH (Hrsg.): Innovationskraftwerk Wedel. [http://www.egeb.de/fileadmin/Dokumente/Foren/130524\\_Energie\\_Erker\\_Innovationskraftwerk\\_Wedel.pdf](http://www.egeb.de/fileadmin/Dokumente/Foren/130524_Energie_Erker_Innovationskraftwerk_Wedel.pdf)
- [7] Knop, I.: Masterthesis Beitrag von Wärmepumpensystemen und Wärmespeichern zur Integration Erneuerbarer Energie, Juni 2015
- [8] Bundesverband Wärmepumpe e.V.: BWP-Branchenstudie 2013 Szenarien und politische Handlungsempfehlungen: Daten zum Wärmepumpenmarkt bis 2012 und Prognosen bis 2030. [http://www.waermepumpe.de/uploads/tx\\_bwppublication/2013\\_BWP-Branchenstudie\\_Bildschirmversion\\_01.pdf](http://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bwppublication/2013_BWP-Branchenstudie_Bildschirmversion_01.pdf)

- [9] Schweizer, Anton: Axialer Temperaturverlauf des Mediums in einer Rohrleitung. <http://www.schweizer-fn.de/waerme/waermeleitung/waermeleitung.php#axial>.
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden: Energieeinsparverordnung.
- [11] Jahn, K. ; Eikmeier, B. ; Ludewig, H. ; Eilmes, S.: Entwicklung der Energieversorgung in Norddeutschland: Perspektiven des Wärmemarktes bis 2020. [http://www.zukunftsrat.de/fileadmin/pdf/energie/Waermestudie\\_ZR\\_2009.pdf](http://www.zukunftsrat.de/fileadmin/pdf/energie/Waermestudie_ZR_2009.pdf)
- [12] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilien-häusern für den Einsatz von KWK-Anlagen: VDI 4655. Düsseldorf, Mai 2008
- [13] Feix, O. ; Obermann, R. ; Strecker, M. ; König, R. ; 50Hertz Transmission GmbH (Hrsg.) ; Amprion GmbH (Hrsg.) ; TenneT TSO GmbH (Hrsg.) ; TransnetBW GmbH (Hrsg.): Netzentwicklungsplan Strom 2014: Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. [http://www.netzentwicklungsplan.de/\\_NEP\\_file\\_transfer/NEP\\_2014\\_2\\_Entwurf\\_Teil1.pdf](http://www.netzentwicklungsplan.de/_NEP_file_transfer/NEP_2014_2_Entwurf_Teil1.pdf)
- [14] Ziems, C. ; Meinke, S. ; Nocke, J. ; Weber, H. ; Hassel, E. ; VGB Powertech (Hrsg.) ; Universität Rostock (Hrsg.): Kraftwerksbetrieb bei Einspeisung von Windparks und Photovoltaikanlagen: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Rostock, Mai 2012
- [15] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: Basisdaten zur Bereitstellung elektrischer Energie. [https://www.ffe.de/download/wissen/186\\_Basisdaten\\_Energietraeger/Basisdaten\\_von\\_Energietraeger\\_2010.pdf](https://www.ffe.de/download/wissen/186_Basisdaten_Energietraeger/Basisdaten_von_Energietraeger_2010.pdf).
- [16] TenneT TSO GmbH: Tatsächliche und prognostizierte Windenergieeinspeisung. <http://www.tennetso.de/site/Transparenz/veroeffentlichungen/netzkennzahlen/tatsaechliche-und-prognostizierte-windenergieeinspeisung>.
- [17] 50Hertz Transmission GmbH: Photovoltaik Prognose und Hochrechnung der eingespeisten Leistung. <http://www.50hertz.com/de/Kennzahlen/Photovoltaik/Archiv-Photovoltaik>.
- [18] Mohr, J. ; Scharre, T. ; Vattenfall (Hrsg.): Fachveranstaltung Heizungsnetzwerk im Heizwerk Barmbek der Vattenfall Wärme Hamburg GmbH Fernwärme Hamburg. <http://www.hamburg.de/contentblob/3902872/data/hn-vortrag-vattenfall-fernwaerme.pdf>.
- [19] Fernwärmeversorgung: Ökonomischer und ökologischer Nutzen für Hamburg. [http://unser-netz-hamburg.de/wp-content/uploads/144px\\_Gutachten\\_LBD\\_Fernwaerme-Hamburg\\_2013\\_09\\_06.pdf](http://unser-netz-hamburg.de/wp-content/uploads/144px_Gutachten_LBD_Fernwaerme-Hamburg_2013_09_06.pdf)
- [20] Klöpsch, M. ; Beecken, J. ; Feuerriegel, S. ; Vattenfall Europe Wärme AG (Hrsg.): Maximierung der Kraftproduktion durch optimale Nutzung des Energiebedarfes im Fernwärmenetz: KWK-Optimierung Projekt Nr.032 7350 A. Hamburg, 2007
- [21] Hermelink, A. ; Bettgenhäuser, K. ; Schüler, V. ; ECOFYS (Hrsg.): Basisgutachten zum Masterplan Klimaschutz für Hamburg: Ergänzungsgutachten: Wärmebedarf der Gebäude: Vergabenummer: FV-NR2-194/09. <http://www.hamburg.de/contentblob/3959518/data/download-ergaenzungsgutachten.pdf>.
- [22] Nitsch, J. ; Pregger, T. ; Naegler, T. ; DLR (Hrsg.) ; Fraunhofer IWES (Hrsg.) ; IfnE (Hrsg.): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global: BMU - FKZ 03MAP146. [http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal\\_2012\\_1/leitstudie2011\\_bf.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf)
- [23] Bouillon, H. ; Machate, R.-D. ; Tetzlaff, G.: Leistungseffekt von Windkraftanlagen. In: Elektrizitätswirtschaft 88 (1989), Nr. 24
- [24] Fabritius, Lars: Stromversorgung im Zeichen der Energiewende – akademische Blätter: Ein Blick auf die energiepolitische Situation in Deutschland im Wahljahr 2013. <http://aka-blaetter.de/deutschlands-stromversorgung-im-zeichen-der-energiewende/>.
- [25] Icha, Petra ; Umweltbundesamt (Hrsg.): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/climate\\_change\\_07\\_2013\\_ich\\_a\\_co2emissionen\\_des\\_dt\\_strommixes\\_webfassung\\_barrierefrei.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/climate_change_07_2013_ich_a_co2emissionen_des_dt_strommixes_webfassung_barrierefrei.pdf)
- [26] Ehrbar, M. ; Rognon, F.: Potenziale von Groß-Wärmepumpen besser nutzen: Konzeption, Anwendungen, Kundensicht. [http://www.bfe.admin.ch/forschungwkk/index.html?lang=de&dossier\\_id=04851](http://www.bfe.admin.ch/forschungwkk/index.html?lang=de&dossier_id=04851).