DOI: 10.24405/13860

Fernwärme in Hamburg und Deutschland: Netzstruktur, Entwicklungsgeschichte und die regenerative Zukunft

Lars-Hendrik Michael*, Baysa Lkhamsuren, Robert Hankers, Detlef Schulz
Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland
*michaell@hsu-hh.de

***Kurzfassung* – Mehr als die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland entfallen auf die Sektoren Wärme und Kälte. Für die Erreichung der Klimaziele spielt deshalb die Wärmeversorgung eine herausragende Rolle. Eine ebenso sichere wie effiziente Maßnahme zur Energieeinsparung in der Wärmeversorgung stellt die sogenannte Fernwärme dar. In diesem Beitrag werden eine historische Einordnung der bisherigen Entwicklungen des Fernwärmesektors vorgenommen sowie die wesentlichen technologischen Grundlagen der zugrunde liegenden Prozesse erläutert. Eine besondere Stellung nimmt hierbei die Kraft-Wärme-Kopplung ein, welche die Energieeffizienz beim Brennstoffeinsatz in Kraftwerken entscheidend verbessern kann. Um den weiteren Ausbau der Fernwärme und von Kraft-Wärme-Kopplung voranzutreiben, wurden unterschiedliche Förderprogramme entwickelt, deren wesentliche Grundzüge erläutert werden.**

Stichworte – Fernwärme, Kraft-Wärme-Kopplung, Fernwärme 4.0, Energiewende im Wärmesektor

NOMENKLATUR

BHKW	Blockheizkraftwerk
EEG	Eneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
GuD	Gas und Dampf
HKW	Heizkraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
TWh	Terawattstunden

I. EINLEITUNG

Auf die Versorgung mit Wärme und Kälte entfällt in Deutschland derzeit insgesamt über 50 % des gesamten Endenergieverbrauchs, was die hohe Bedeutung des gesamten Sektors zum Gelingen der Energiewende verdeutlicht [1]. Die Fernwärme kann hierbei einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten, basiert bislang aber größtenteils auf fossilen Energieträgern. In Ihrer 140-jährigen Geschichte hat die Fernwärme in Hinblick auf Wärmemedium, Temperatur, Erzeugungs- und Transportsystem sowie die Planung und Implementierung eine mehrstufige Entwicklung vollzogen. In der etablierten Ausführung bieten Fernwärmenetze eine sichere und effiziente Wärmeversorgung für die angeschlossenen Verbraucher. Wesentlicher Aspekt ist nach wie vor die Nutzung von Wärmekraftwerken über die sogenannte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), bei der die Abwärme aus der Elektrizitätserzeugung zur Wärmegewinnung genutzt wird. Die Brennstoffeffizienz lässt sich auf diese Weise maßgeblich verbessern. Die gültigen Klimaschutzziele der EU, der Bundesregierung und auch der Bundesländer und Gemeinden üben einen erhöhten Entwicklungsdruck auf die Wärmeversorger aus, der das System Fernwärme vor große Herausforderungen stellt. Die Entwicklung geht deshalb immer deutlicher in Richtung des Einsatzes erneuerbarer Energien und der flexiblen digitalen Planung und Steuerung, woraus nun eine sog. vierte Generation (Fernwärme 4.0) entsteht. Um die Fernwärme als für den Klimaschutz wichtiges System zu verstehen, stellt dieser Beitrag zum einen den jetzigen Status der Fernwärme dar, bevor zum anderem kurze Einblicke in eine weitere Entwicklung gegeben werden. Im Folgenden wird zunächst der derzeitige Status quo der Fernwärme in Deutschland und Hamburg dargestellt, wobei auch die lokale Entwicklungsgeschichte und zukünftige Entwicklung berücksichtigt werden soll. Es folgen Zusammenfassungen und Darstellungen zu technischen Produktions- und Anschlussbedingungen der Fernwärme sowie ein Überblick über die Kraft-Wärme-Kopplung mit Fokus auf die Situation im Raum Hamburg. Abschließend werden die weiteren Potenziale der Fernwärmeversorgung sowie Handlungsempfehlungen für Ausbau und Weiterentwicklung der Technologien aufgezeigt.

II. STATUS QUO UND ENTWICKLUNGSGESCHICHTE DER FERNWÄRME IN DEUTSCHLAND UND HAMBURG

Auf den Sektor Wärme und Kälte entfällt deutlich mehr als 50 % des gesamten Endenergieverrbauchs Deutschlands. Von den insgesamt über 2.500 TWh des Endenergieverbrauchs für Wärme entfällt jedoch nur ein Anteil von 120 TWh, d.h. 4,8 %, auf die Fern- oder Nahwärme. Noch vor der Industrie mit 46 TWh machten 2018 private Haushalte mit 49 TWh den größten Absatz der Fernwärme aus [1]. Insgesamt waren 2017 rund 26.400 km Fernwärmeleitungen in Deutschland verbaut, davon rund 700 km (2,6 %) Dampfleitungen. Es wurden insgesamt 140 TWh Wärme eingespeist, hierbei lag der KWK-Anteil bei über 66 % [2]. Insgesamt 680 Fernwärmeversorgeunternehmen waren am Markt beteiligt, wovon 552 Unternehmen auch als Wärmeerzeuger tätig waren [2].

Im Hinblick auf private Haushalte ist die Fernwärme nach Erdgas- und Ölzentralheizungen der am dritthäufigsten verwendete Energieträger bei der Wärmeversorgung [3]. Durchschnittlich wird in 13,9 % aller Wohngebäude und damit in 5,6 Mio. Wohneinheiten Fernwärme verwendet, wobei die Verbreitung in Deutschland strukturell und historisch bedingt große Unterschiede aufweist. So ist in großen Ballungsräumen sowie allgemein in den ostdeutschen Bundesländern der Anteil der Fernwärme höher als in ländlich geprägten Räumen der übrigen Bundesländer. Den höchsten Anteil verzeichnet Berlin mit einem Fernwärmeanteil von 37,1 % in den Wohngebäuden. Den niedrigsten Wert hingegen verzeichnet das Saarland mit rund 4 %. Dabei gibt es vor allem bei Wohnungsneubauten seit Jahren einen deutlichen Trend in Richtung Fernwärme, 2018 wurden bereits 25,3 % aller neuen Wohneinheiten an die Fernwärme angeschlossen [1]. Außerdem bestehen in Deutschland große Ausbaupotenziale bei der Modernisierung von Bestandsgebäuden. In Deutschland sind 40 % aller Heizungsanlagen über 20 Jahre alt und könnten erneuert werden, wobei insbesondere bei alten Ölheizungen eine Umstellung des Energieträgers in den Fokus rückt [1]. Außerdem bestehen große Potenziale im Bereich der Nichtwohngebäude, allein bei über 100.000 öffentlichen Gebäuden besteht ein energetischer Sanierungsbedarf [3].

Als leitungsgebundener Energieträger ist die Fernwärme in Deutschland hoch reguliert [2]. Mehrere Gesetze sollen die Energieversorgung klimaschützend, umweltfreundlich, sicher und wirtschaftlich ausbauen, um damit die Energiewende voranzutreiben. Im Vergleich zur Stromproduktion, bei der Erneuerbare bereits über 42 % der Erzeugung ausmachen, zeichnen sich Wärme und Kälte durch einen erhöhten Nachholbedarf aus [4]. Der Gesetzgeber fokussiert sich vor allem auf die Aspekte Gebäudeneubau und Modernisierung sowie auf die Erzeugung von Wärme, wobei neben dem weitreichend bekannten EEG vor allem das EEWärmeG sowie das KWKG zu nennen sind. Mit dem EEWärmeG sollte ab 2009 indirekt regulativ auf den Energiemarkt Einfluss genommen werden, sodass bis zu diesem Jahr die erneuerbaren Energien einen Mindestanteil von 14 % am Endenergieverbrauch von Wärme und Kälte ausmachen. 2019 wurde dieser Wert mit 14,5 % bereits übertroffen. Beim EEWärmeG handelt es sich um sog. gebäudebezogenes Energiesparrecht, es setzt also bei den Eigentümern von Neubauten und nicht bei Wärmeproduzenten an, die verpflichtet werden, den Wärmebedarf anteilig mit erneuerbaren Energien zu decken [5]. Über ein Marktanreizprogramm der Bundesregierung werden Hauseigentümer auch bei der Modernisierung finanziell unterstützt [6]. Falls der Eigentümer nicht direkt in Erneuerbare investieren möchte, können sog. Ersatzmaßnahmen getroffen werden. Hierzu zählen unter anderem die Nutzung von Abwärme für mindestens 50 % des lokalen Wärme- und Kältebedarfs sowie die Zurverfügungstellung von Dachflächen zur nachhaltigen Wärmeerzeugung von Dritten. Auch der Anschluss an die Fernwärme zählt ausdrücklich zu diesen Maßnahmen, die jedoch auch konventionell erzeugt werden kann. Auf der Seite der Fernwärmeproduzenten greift dann wiederum das KWKG, das den Neubau und die Modernisierung von gekoppelter Kraft- und Wärmeerzeugung fördert [7], [8] (Siehe Kapitel IV). Auch auf Ebene der Bundesländer gibt es weitere Gesetzgebungen, die Einfluss auf die Verbreitung von Fernwärme haben. Erwähnt sei hierbei das Hamburgische Gesetz zum Schutz des Klimas durch Energieeinsparung (HmbKliSchuG), bei dem eine Anbindung von Gebieten an das Fernwärmenetz vorgeschrieben werden kann [9]. Mit Blick auf die Fernwärme liegt der EE-Anteil deutschlandweit bei über 19 %. Dies stellt trotz eines steigenden Einsatzes von erneuerbaren Energien einen geringen Anteil dar, insbesondere wenn man bedenkt, dass der EU-Durchschnitt bei 21 % liegt und nur fünf andere EU-Staaten einen geringeren Anteil an Erneuerbaren im Bereich Wärme und Kälte vorweisen [10]. 2017 wurden in Deutschland immer noch knapp 70 % der Fernwärmeenergie aus Erdgas, Stein- und Braunkohle sowie Mineralöl gewonnen. Demgegenüber sind unter den Erneuerbaren biogene Festbrennstoffe aus den Privathaushalten, der Industrie und dem Handel mit 62,5 % am meisten vertreten [7].

Als einer der größten Ballungsräume Deutschlands besitzt auch Hamburg ein ausgedehntes Fernwärmenetz, welches von der städtischen Wärme Hamburg GmbH betrieben und ausgebaut wird. Heute werden bei einer thermischen Leistung von 1.800 MW 31,2 % aller Wohngebäude mit Wärme versorgt, was etwa 22 % aller hamburger Haushalte entspricht [11]. Insgesamt sind 495.000 Nutzeinheiten an die Fernwärme angeschlossen, was auch Gewerbekunden und die Industrie mit einbezieht [12]. Das Hamburger Netz weist aktuell eine Länge von 845 km auf, die sich auf das innerstädtische Kerngebiet sowie auf mehrere periphere Inselnetze, wie in Schnellsen und Neuallermöhe, verteilen. Jedes Jahr wird das Netz um 5 bis 10 km erweitert [13]. Zwischen Tiefstack und Hammerbrook besteht zudem ein 17 km langes Dampfnetz, welches jedoch aufgrund der hohen Instandhaltungskosten zurückgebaut wird [12]. Im Heizwassernetz wird Heißwasser mit einer Temperatur von 90 bis 133 °C im Zulauf und 50 °C im Rücklauf verwendet. Im verdichteten städtischen Raum Hamburgs ergibt sich ein für Gesamtdeutschland vergleichsweise hoher Leistungswert von 4,0 MW pro km Fernwärmetrasse, sowie niedrige thermische Netzverluste von rund 11 % [12]. Wärme Hamburg verfügt dabei über 11 Heizkraftwerke, Heizwerke und BHKWs, wobei der KWK-Anteil bei 90,4 % und der Anteil an erneuerbaren Energien bei 13,8 % liegt. Die drei größten Erzeugungsanlagen sind das Heizkraftwerk Tiefstack mit einer Wärmeleistung von 779 MW (aus Steinkohle und Erdgas), das Heizkraftwerk Wedel mit einer Wärmeleistung von 389 MW (aus Steinkohle) sowie das Heizwerk HafenCity mit einer Wärmeleistung von 315 MW (aus Erdgas) [13].

In Hamburg begann das Zeitalter der Fernwärme bereits im Jahr 1884 [14]. Damit lässt sich die Entwicklungsgeschichte der Fernwärme sehr gut am Hamburger Netz nachzeichnen. Wie damals üblich, basierte das frühe Fernwärmenetz der ersten Generation in der Hansestadt auf Hochdruckdampf als Wärmemedium, eine Ausführung, die zuvor vor allem in Nordamerika installiert wurde [15]. Erster Kunde war das damals neu errichtete Hamburger Rathaus, welches aus einem 330 m entfernten Kraftwerk in der Poststraße mit Heißdampf versorgt wurde [14]. Anfangs wurde das Netz über Kohledampfkessel versorgt, die nachträglich in das bestehende Kraftwerk zur Stromproduktion installiert wurden. Transportiert wurde der Dampf meist über vor Ort isolierte und in kostenaufwendiger Kanalbauweise verlegte Stahlrohre [16]. Seit den späten 1920er Jahren kann von einer zweiten Generation gesprochen

werden, die auf hochtemperiertes Wasser als Wärmemedium setzt. Auch in Hamburg wurde 1926 zum ersten Mal Heißwasser als Medium verwendet und der erste Heizwasserspeicher mit einer Kapazität von 2.700 Kubikmeter Wasser errichtet [14]. Bereits ab 1921 wurde das erste Fernheizwerk mit KWK entwickelt, nachdem bereits reine Heizwerke errichtet wurden. Die immer intensivere Nutzung von KWK, aber auch die Nutzung von Abwärme zeichnete die zweite sowie in der Folge auch die dritte Generation der Fernwärme aus. Die Entwicklung ging dabei immer weiter in Richtung niedrigere Transporttemperaturen, effizientere, vorproduzierte Transportsysteme und eine intensivere Kopplung von Strom und Wärme und dem Nutzen von Abwärme, was schließlich ab den späten 1970er Jahren in der dritten Generation mündete. Das Hamburger Versorgenetz, welches Ende der 1920er Jahre als das längste Fernwärmenetz Europas galt, wurde stetig ausgebaut, sodass 1963 die 100 km- und bis 1993 die 600 km-Marke erreicht wurde [14]. In den 2000er Jahren rückten dann schließlich neben der Effizienzsteigerung und der Versorgungssicherheit die Dekarbonisierung des Energiesektors immer weiter in den Fokus der Entwicklungen.

Eine Aktuelle Herausforderung der Fernwärme-infrastruktur in Hamburg ist ein umfassender Erneu-erungsdruck, der klar von den Klimaschutzzielen des Hamburger Senats und der Bundesregierung ausgeht. Die größten Erzeugungsanlagen in Wedel und Tiefstack haben mittlerweile ein fortgeschrittenes Alter erreicht, was sich auch in einem vergleichsweise geringen Einsatz von erneuerbaren Energien in der Hansestadt widerspiegelt. Ein direkter Handlungszwang ergibt sich zuletzt auch dadurch, dass das Kraftwerk Wedel bereits 2025 vom Netz gehen soll [17]. Vor diesem Hintergrund wurden Pläne formuliert, die einen kompletten Kohleausstieg der Wärmeversorgung Hamburgs vorsehen und dabei einen Wechsel hin zu einem flexiblen Erzeugungsverbund aus Gas, dezentraler Abwärmeerzeugung und verschiedenen erneuerbaren Energiequellen erreichen (vgl. [12], [18]). Hamburg als Stadtstaat muss dabei natürlich immer das Problem der Flächenknappheit berücksichtigen, auch wenn mit neueren dezentralen und hocheffizienten Gasheizwerken, der Nutzung eines kombinierten Biogas- und Kompostwerks und der Abwärmenutzung eines Stahlwerks erste bedeutende Schritte in Richtung nachhaltiger Wärmeversorgung beschritten wurden [9]. Die städtischen Versorger kooperieren zudem mit mehreren Hochschul-partnern im Rahmen von Forschungsprojekten. Mit dem Verbundforschungsprojekt „Integrierte WärmeWende Wilhelmsburg“ (IW³) wird der für die Fernwärme in Zukunft sehr wichtige Aspekt der saisonalen Speicherung über Aquifere untersucht [19]. Beim Projekt des Norddeutschen Reallabors „integrierte Netzplanung“ (iNeP) wird unter Beteiligung der HSU das komplexe Thema der effizienten, ganzheitlichen, digitalen Netzplanung behandelt [20].

III. Technische Grundlagen und Infrstruktur der Fernwärmeversorgung

Als Fernwärme wird die zentrale Wärmeversorgung von Verbrauchern aus einer Fernwärmeerzeugungsanlage über ein Fernwärmenetz bezeichnet, wobei sich das Fernwärmeversorgungssystem aus den folgenden Hauptkomponenten zusammensetzt [21]:

- Fernwärmeerzeugungsanlage
- Fernwärmenetz
- Pumpstation und Druckhaltungsanlage
- Hausanschluss
- Hausübergabestation
- Hausverteilung

Bei der Fernwärmeversorgung wird die Wärme in einer *Erzeugungsanlage*, z.B. in einem Heizkraftwerk, zentral erzeugt. In einem großen Heizkraftwerk werden in der Regel Entnahme-Kondensationsturbinen eingesetzt. Bei dieser Turbine ist eine sehr flexible Anpassung der Wärmeausskopplung durch die Steuerung der entnommenen Dampfvolumen möglich.

Das technische Prinzip der Energieumwandlung in dampf-thermischen Anlagen sind die sogenannten Kreisprozesse. Die wichtigsten Kreisprozesse sind für die Stromerzeugung in Heizkraftwerken der Clausius-Rankine-Vergleichsprozess mit Wasser als Arbeitsmittel und der Joule-Prozess bei Gasturbinenanlagen. Die Abbildung 1 zeigt das Prinzip des Clausius-Rankine-Vergleichs-prozesses als Beispiel.

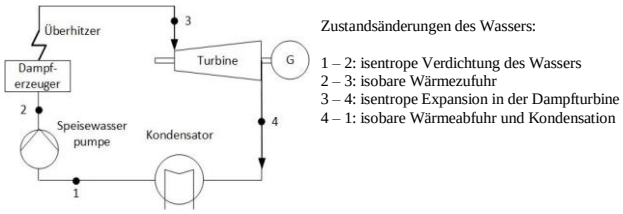

Abbildung 1: Clausius-Rankine-Prozess.

Die zugeführte bzw. abgeführte Wärme eines Dampfprozesses wird aus dem Temperatur-Entropie-Diagramm (T-s-Diagramm) des Arbeitsmittels berechnet. Die Wärme Q ist das Produkt aus der absoluten Temperatur T und Entropiedifferenz Δs.

$$Q = T * \Delta s \tag{1}$$

Der thermischer Wirkungsgrad läßt sich wie folgt berechnen:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{ab}}{Q_{zu}} \tag{2}$$

Die Turbinen in den großen Heizkraftwerken sind so konzipiert und gebaut, dass man beim Betrieb Wärme im Niederdruckteil auskoppeln kann. Für die Bereitstellung der Fernwärme wird ein Teil des noch arbeitsfähigen Dampfes in einen Heizkondensator geleitet und so entstandenes Heisswasser wird in das Fernwärmenetz gepumpt.

Die meisten Fernwärmenetze in Deutschland werden als Zweileitersystem auf eine maximale Vorlauftemperatur von 130 °C und für Nenndruckstufen ND 16 oder ND 25 ausgelegt [21]. Als Wärmeträger wird meistens Heißwasser eingesetzt. Der Druck ist abhängig von mehreren Parametern, wie Netzlänge und Rohrmaterial. Man unterscheidet zwischen gleitendem Betrieb, gleitend-konstantem-Betrieb und konstantem Betrieb. In der Regel wird die Vorlauftemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur gleitend zwischen

70 °C und 130 °C, gefahren. Die niedrigste Vorlauftemperatur von 70 °C ist notwendig, um eine Erwärmung von Brauchwarmwasser in den Hausstationen auf 60 °C zu gewährleisten. Die Rücklauftemperatur wird bei der Auslegung auf 70 °C bzw. bei modernen Netzen auf 50 °C festgelegt. Die Höhe des Nenndruckes wird durch die tiefste Stelle im Netz bestimmt. An dieser Stelle des Netzes darf der Druck in keinem Betriebsfall, auch nicht bei Druckstößen, den zulässigen Druck im System übersteigen.

Die Auswahl der Rohrsysteme für Fernwärmeleitungen ist von Standortbedingungen (Werkleitungen, Umgebung, Bauten, Straßen, Gleise, Unterquerungen, Grundwasser, Bodenbeschaffenheiten und Baumstand) und Betriebsparametern (Betriebstemperatur, Betriebsdruck, Leckageüberwachung, Wärmeverlustkosten, Abnehmer-dichte, Nennweiten, Art der Tiefbauverlegung) abhängig [22]. Aufgrund der Standardisierung und der Robustheit werden überwiegend erdverlegte Kunststoffmantelrohre als Fernwärmeleitungen eingesetzt. Abhängig von der Anwendung und dem Hersteller werden diese Rohre für maximale Betriebstemperaturen zwischen 140 °C und 160 °C und für einen Nenndruck von 25 bar hergestellt. Die Rohre bestehen aus dem sog. Mediumrohr aus Stahl, der Polyurethan-Wärmedämmung und dem Kunststoffmantel. Das Mantelrohr schützt die Wärmedämmung vor äußeren Einflüssen. Die Wärmedämmung aus Polyurethanschaum trägt das Gewicht des befüllten Mediumrohres und stellt einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Mediumrohr, Wärmedämmung und Mantelrohr her [22]. Der spezifische Wärmeverlust der Rohre pro Trassenmeter ist von dem Innen- und Außendurchmesser, der Wandstärke und der Dämmstärke des Rohres abhängig.

Für den Wasserumlauf in Fernwärmenetzen werden drehzahlgeregelte *Umwälzpumpen* mit einem hohen Wirkungsgrad eingesetzt. In ABBILDUNG 2 ist die Fernwärmeversorgung von Haushalten schematisch dargestellt.

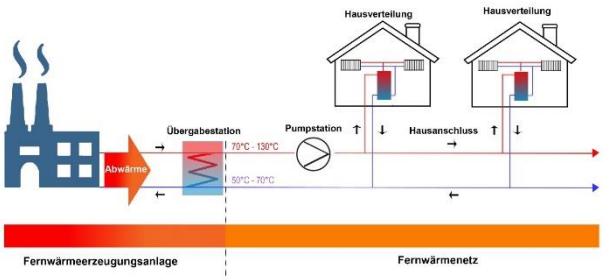

ABBILDUNG 2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER FERNWÄRME-VERSORGUNG VON HAUSHALTEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH [22]).

In einem geschlossenen System muss die Volumenänderung kompensiert werden, um den Druck konstant zu halten. Dazu werden sog. *Druckhalteanlegen* eingebaut. Diese Anlagen haben folgende Aufgaben:

- Den Druck an jeder Stelle des Systems in zulässigen Grenzen (maximal zulässige Überdruck, Mindestdruck) halten
- Kompensation der Volumenschwankungen des Wassers infolge der Temperaturschwankung
- Vorhalten von systembedingten Wasserverlusten in Form einer Wasservorlage.

In ABBILDUNG 3 ist ein typischer Wärmenetzanschluss eines Hauses mit den einzelnen Komponenten und mit den Eigentumsverhältnissen schematisch dargestellt. Die wichtigsten Begriffe der Wärmeversorgung ist den Normen DIN 4747-1 und VDI 2036 definiert.

Die *Hausanschlussleitung* verbindet das Fernwärmnetz mit der Übergabestation und ist Eigentum des Wärmenetzbetreibers. Der Wärmelieferant bestimmt die Auslegung und die Ausführung der Hausanschlussleitung. Diese wird meistens aus Kunststoffmantelrohr oder aus Biegerohr hergestellt. *Die Übergabestation* ist in der DIN 4747-1 als das Bindeglied zwischen der Hausanschlussleitung *der Hausanlage definiert.* Die Übergabestation hat die Aufgabe, die Wärme mit den vereinbarten Parametern (Druck, Temperatur, Volumen) an die Hausanlage zu übergeben. Die Hauszentrale ist das Bindeglied zwischen Übergabestation und der Hausanlage und dient der Anpassung der Wärmelieferung. Man unterscheidet zwischen direktem und indirektem Anschluss. Bei einem direkten Anschluss wird das Heizwasser aus dem Fernwärmenetz direckt durch die Hausanlage geführt, sodass die Versorgung aus einem gemeinsamen Wasserkreislauf besteht. Bei dem indirekten Anschluss wird das Heizwasser vom Fernwärmenetz durch einen Wärmetauscher hydraulisch getrennt. So entstehen im System zwei separate Wasserkreisläufe.

Die *Hausstation* vereint die Übergabestation und die Hauszentrale [21]. Für kleinere und mittlere Anlagen bis 400 kW Leistung werden betriebsfertige Kompaktstationen mit montierten Teilen inklusive Elektroinstallation eingesetzt. Zur Steigerung der Effizienz bei der Wärmeversorgung und Erhöhung der Versorgungssicherheit werden in Fernwärmenetzen thermische Energiespeicher integriert.

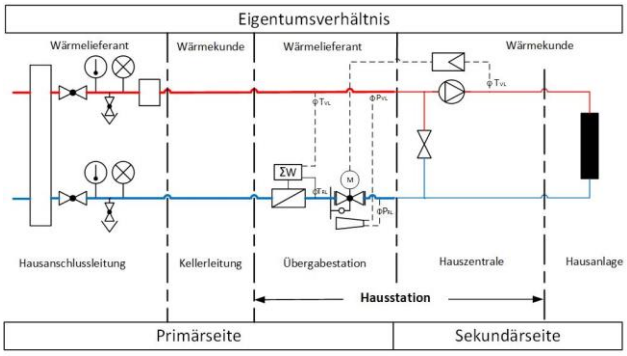

ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES WÄRMENETZ-ANSCHLUSSES IN EINEM WOHNHAUS [22].

Man unterscheidet zwischen sensibler Wärmespeicherung, latenter Wärmespeicherung und thermochemischer Wärmespeicherung. Der Einsatz thermischer Energie-speicher bietet daher ein erhebliches Potentioal zur Opti-mierung des Anlagenbetriebs und Senkung des Primär-energieverbrauchs. In Rahmen der Energiewende bestehen noch weitere Möglichkeiten für die Optimierung und Flexibilisierung der Wärmeversorgung durch Nutzung des

Fernwärmenetzwerks als Speicher, Installation eines Warmwasserspeichers, Prozeßoptimierung bei der Wärmeauskopplung, Installation von Elektrodenkessel-Anlagen (Power to Heat-Technologie), durch Nutzung industriellen Abwärme und durch Nutzung von Niedertemperatur-Abwärme mittels Wärmepumpen.

Für die Verbaucher, die an das Fernwärmenetz angeschlossen sind oder angeschlossen werden, gelten die Technischen Anschlussbedingungen (TAB) des jeweiligen Wärmerversorgers vor Ort, z.B. TAB von Wärme Hamburg GmbH.

Die TAB sind Bestandteil des Wärmeliefervertrages und dienen dem Wärmelieferanten und dem Wärmeabnehmer als Vorgabe zur Sicherstellung der technischen Aspekte bei Planung, Umsetzung und Betrieb der Wärmeversorgung. In der TAB werden die Punkte, wie Geltungsbereich, Begriffe, Druck und Temperatur, Wärmeübertrager, Wärme-übergabestation, Regelung, Montage und Inbetriebnahme geregelt.

IV. Kraft-Wärme-Kopplung in dezentraler Ausführung

Eine bereits seit vielen Jahrzehnten genutzte Technologie, welche in den kommenden Jahren noch einmal eine steigende Bedeutung bei der Auslegung von Wärmenetzen erfahren wird, ist die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung, auch bekannt als Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Durch den Einsatz von Brennstoffen zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme ergeben sich Vorteile in der Primärenergieeffizienz gegenüber einer ungekoppelten Erzeugung, da beispielsweise die Systemabwärme zur Erhitzung von Heizwasser für Industrie- und Privatanwender genutzt werden kann. Mit Hilfe dieser Prozesse lässt sich der Brennstoff-ausnutzungsgrad im Vergleich zur getrennten Erzeugung um bis zu 30 % erhöhen. Auf diese Art können Ressourcen geschont und CO_2-Emissionen reduziert werden. Derzeit befindet sich diese Technologie noch im Wachstum, welches unterschiedlichen Studien zufolge noch bis zum Jahr 2030 anhalten könnte [23]. Die aktuelle Fassung des KWK-Gesetzes verfolgt das Ziel von 120 TWh Strom aus KWK im Jahr 2025, was einer Erhöhung um 16,5 % gegenüber dem Wert von 2012 entspricht [24]. Dieses Ziel wird aller Voraussicht nach übererfüllt werden, lag doch die Stromerzeugung bereits im Jahr 2017 bei 117 TWh. Die in gekoppelten Anlagen erzeugte Wärme erhöhte sich zwischen 2012 und 2017 um 7 % auf 226 TWh [23].

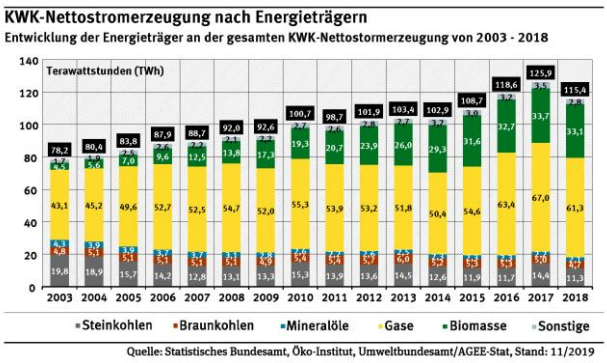

Abbildung 4: KWK-Nettostromerzeugung in TWh nach Energieträger [25].

Die Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der KWK-Nettostromerzeugung seit dem Jahr 2003 [25].

Deutlich erkennbar ist, dass der wesentliche Anteil der Stromerzeugung mittels fossiler Energieträger und hier vor allem mit Erdgas stattfand. Steigende Anteile an der Stromerzeugung hatte zudem die Energiegewinnung aus Biomasse. Mit einem zukünftig abnehmenden Anteil fossiler Energieträger am Gesamtenergiemix ist allerdings absehbar, dass auch der Einsatz von fossilen KWK-Anlagen langfristig nachlassen wird [26]. Zwar werden auch in Zukunft KWK-Anlagen auf Basis von Biomasse und somit regenerativem Brennstoff in Betrieb bleiben. Diese haben jedoch insgesamt nur einen kleinen Anteil an der Strom- und Wärmeerzeugung, wenngleich auch der KWK eine besondere Rolle in der Fernwärme zukommt. In beiden Bereichen existieren zudem regenerative Technologien, die gänzlich ohne Brennstoffe auskommen. KWK-Anlagen sind demnach vor allem als Übergangstechnologie zu betrachten, mit deren Hilfe fossile Kraftwerke bis zu ihrem Laufzeitende ökologisch vorteilhaft betrieben werden können [24]. Alternativen zur Wärmeerzeugung mit zentralisierten KWK-Anlagen finden sich vor allem in dezentralen Blockheizkraftwerken (BHKW), Wärmepumpen, Elektrodenkesseln und Solar- sowie Geothermie.

Die technische Umsetzung von KWK-Anlagen basiert ursprünglich auf traditionellen Dampfturbinen-Heizkraftwerken. In der einfachsten Form wird in den Kühlkreislauf des erzeugten Hochdruckdampfes ein Wärmeverbraucher integriert, welcher einen Teil der Abwärme zu weiteren Verwendungszwecken abführen kann. In den letzten drei Jahrzehnten wurden weitere Bauarten entwickelt, die sich hinsichtlich des verwendeten Brennstoffs, der Leistungsklasse sowie der Methoden zur Wärmeauskopplung unterscheiden. Zum Einsatz kommen hier unterschiedliche Techniken: Dampfturbinen, Gasturbinen, Verbrennungsmotoren, Dampfmotoren, Stirlingmotoren, ORC-Anlagen oder Brennstoffzellen. Jede dieser Techniken hat ihre speziellen Parameter, welche sich hinsichtlich der wesentlichen Kennwerte Stromkennzahl, elektrischem Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad voneinander unterscheiden. Insbesondere im unteren Leistungsbereich, beispielsweise in Ein- und Mehrfamilienhäusern, kommen kleinere BHKW zum Einsatz. Diese werden üblicherweise wärmegeführt betrieben und sind ausschließlich zur lokalen Verwendung vorgesehen. Ein Anschluss an ein Fernwärmenetz erfolgt hier in der Regel nicht. Im Gegensatz dazu verfügen große Heizkraftwerke nicht nur über Anschlüsse an das Stromnetz, sondern zusätzlich auch über separate Dampf- und Wärmekreisläufe. In Abbildung 5 ist das Wärmeschaltbild eines Dampfturbinen-Heizkraftwerks dargestellt [21]. Links zu sehen ist eine Gegendruckanlage, bei der Strom- und Wärmeerzeugung starr aneinander gekoppelt sind. Der Brennstoff wird dem Hochdruck-Kessel zugeführt und erzeugt dort heißen Dampf unter hohem Druck. In der Gegendruck-Turbine gibt dieser Dampf einen Teil seiner Energie als kinetische Energie auf die Welle der Turbine ab, welche daraus mittels eines Generators Strom erzeugt. Der nun entspannte Dampf wird einem Kühlkreislauf zugeführt, in welchem die Restwärme entzogen wird und das Prozesswasser wieder kondensiert. Eine flexible Reaktion auf schnell ändernde Stromspitzen ist bei diesen Anlagen nicht möglich, wenn nicht zusätzlich Wärmespeicher oder

Hilfskondensatoren zum Einsatz kommen. In KWK-Anlagen wird die Wärmeenergie dem Kühlkreislauf entnommen und einem Wärmeverbraucher zugeführt. Dabei kann es sich um ein Fernwärmenetz handeln, häufig erfolgt die Abnahme jedoch von Industrieverbrauchern, welche sich in unmittelbarer Nähe zum Kraftwerk befinden. In einer Entnahme-Kondensationsanlage, welche rechts in ABBILDUNG 5 zu sehen ist, kann die Stromerzeugung unabhängig von der benötigten Wärmeleistung stattfinden, wobei jedoch der Gesamtwirkungsgrad der Anlage reduziert wird. Eine Dampfentnahme findet hierbei über Steuerventile aus der Hochdruckturbine statt, aus welcher ein Teil des Dampfes dem Wärmeverbraucher zugeführt wird. Je nach Lastzustand im Stromnetz kann hierbei die Menge variabel angepasst werden. Der restliche Dampf wird in eine Kondensationsturbine geleitet, wo zusätzlicher Strom erzeugt wird. Je nach Leistungsklasse können die Turbinen auch mehrstufig ausgeführt werden, wobei in jeder Stufe eine Dampfentnahme stattfinden kann. Grundsätzlich lässt sich hierbei sagen, dass der Gesamtwirkungsgrad einer Anlage sinkt, je mehr Strom ungekoppelt erzeugt wird, da in diesem Fall die Nutzung der Abwärme entfällt [21].

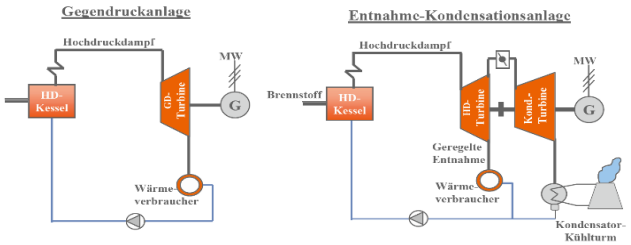

ABBILDUNG 5: WÄRMESCHALTBILD VON DAMPFTURBINEN-HEIZKRAFTWERKEN [21].

Weiter optimiert wird dieser Prozess in Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerken (GuD-HWK). Das vereinfachte Wärmeschaltbild eines solchen Kraftwerks ist in ABBILDUNG 6 zu sehen.

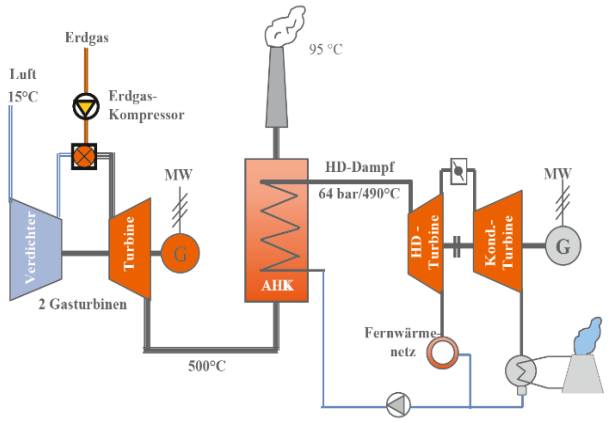

ABBILDUNG 6: VEREINFACHTES WÄRMESCHALTBILD EINES GUD-HKW [21].

Wie der Name bereits sagt, wird hier die Funktion einer Gasturbine mit der einer Dampfturbine kombiniert. Die bei der Gasverbrennung in der Turbine entstehende Wärme wird hierbei in einem zweiten Prozessschritt einem Abhitzekessel zugeführt, in welchem die Erzeugung von Dampf unter hohem Druck stattfindet. Dieser treibt wiederum eine Hochdruckturbine sowie eine Kondensationsturbine an. Aus dem Dampfkreislauf kann nun, analog zum Dampfturbinen-Heizkraftwerk, Wärmeenergie in Form von Dampf entnommen und zur Versorgung von Wärmeverbrauchern verwendet werden. Da sich Gasturbinen prinzipbedingt relativ schnell ansteuern lassen, vereinen diese Anlagen einen hohen Wirkungsgrad mit einer schnellen Reaktionsfähigkeit.

Die bereits erwähnten Hamburger Großkraftwerke Tiefstack und Wedel sind beides KWK-Anlagen, die zusammen eine Wärmeleistung von 1168 MW erbringen können. Während Wedel bereits im Jahr 1987 für den Einsatz als Heizkraftwerk erweitert wurde, entstand das HKW Tiefstack im Jahr 1993, damals noch als reines Steinkohlekraftwerk. Die Erweiterung um eine GuD-Anlage erfolgte im Jahr 2009. Das neueste Kraftwerk ist das Heizkraftwerk Moorburg, welches 2014 erstmals ans Netz ging. Obwohl dieses als eins der modernsten Kohlekraftwerke Europas gilt, wird die Wärmeleistung derzeit durch eine unzureichende Anbindung an das Fernwärmenetz limitiert. Im Maximum könnten bis zu 650 MW Fernwärme abgegeben werden [27]. Zusätzlich zu diesen kombinierten Heizkraftwerken existieren weitere Heizkraftwerke, die ausschließlich Wärme für das Fernwärmenetz produzieren. Neben diesen Großkraftwerken gibt es im Hamburger Stadtgebiet noch eine Reihe weiterer, kleinerer KWK-Anlagen im BHKW-Format. Als Beispiel ist hier das BHKW Neuallermöhe zu nennen, welches zusammen mit dem Bergedorfer Stadtteil Neuallermöhe-West im Jahr 1997 errichtet wurde [28]. Als relativ junges Baugebiet konnte hier bereits während der Planungsphase viel Wert auf eine klimaschutzgerechte Umsetzung gelegt werden. So wurden hier für die Wohngebäude durch energiesparende Bauweisen Heizleistungen von 70 W/m² erzielt, im Vergleich zu 116 W/m² für ein durchschnittliches älteres Gebäude im Hamburger Stadtgebiet. Die Wärmeversorgung kann hier demnach – mit Ausnahme einzelner Wohngebäude am Siedlungsrand – ausschließlich über die Fernwärme aus dem BHKW sichergestellt werden. Die Anlage arbeitet mit einem Brennstoffnutzungsgrad von über 90 % bei einer Jahresnutzungsdauer von 7200 Stunden, mit einer thermischen Leistung von 27,1 MW und einer elektrischen Leistung von 5,2 MW. Ähnliche Anlagen finden sich bspw. in Burgwedel oder im BHKW Borsigstraße.

Mit dem KWK-Gesetz wurden diverse Förderinstrumente geschaffen, welche für eine beschleunigte Einführung von KWK-Anlagen sorgen sollen. Seit dem Bestehen des KWKG wurden dabei unterschiedliche Mechanismen verwendet, die sich hinsichtlich ihres Umfangs und der Art der Förderung unterscheiden [23].

A. *Einspeisevergütung*

Mit diesem Instrument soll direkt die KWK-Stromerzeugung gefördert werden. Der Anlagenbetreiber erhält eine fixe Vergütung für eingespeisten KWK-Strom, welche unabhängig von aktuellen Börsenstrompreisen ist. Der Erzeugungszeitpunkt spielt somit keine Rolle und eine Maximierung des Profits kann nur durch hohe Betriebsstundenzahlen erzielt werden.

B. *Gleitende Marktprämie*

In diesem Fall hängt die Förderung von den möglichen Einnahmen aus der Direktvermarktung des Stromes ab. Bei niedrigen Strompreisen werden die Einnahmen auf einen

Mindestbetrag aufgestockt, so dass in diesem Fall diese Fördermethode der Einspeisevergütung gleicht. Bei einem Börsenstrompreis über diesem Niveau entfällt jedoch die Förderung und der Börsenpreis wird erzielt. Hier kann eine gezielte Stromerzeugung im Zeitraum geringer Stromverfügbarkeit und somit hoher Börsenpreise für zusätzliche Erlöse sorgen.

C. Fixe Marktprämie mit Korridor

In diesem Fall wird auf den erzielten Markterlös ein Fixbetrag aufgeschlagen, so dass sich die Gesamtvergütung als Summe dieser Beträge ergibt. Dadurch folgt die Summe dem Verlauf des Strompreises. Es ist allerdings ein Korridor festgelegt, durch den die Förderbeträge begrenzt werden. Bei niedrigen Preisen wird ein Mindestwert gezahlt, allerdings ist der Maximalwert ebenfalls gedeckelt.

D. Fixe Marktprämie

Auf diesem Förderinstrument basiert die aktuell geltende Fassung des KWKG. Hier wird ein fixer Zuschlag auf den Markterlös aufaddiert, unabhängig von der aktuellen Höhe des Börsenstrompreises. Der Gesamtpreis kann somit höher, aber auch tiefer als beim Instrument "Fixe Marktprämie mit Korridor" ausfallen. Dies erhöht den Anreiz, den produzierten Strom systemdienlich anzubieten, also hohe Strompreise auszunutzen. In einer Variation dieses Instruments erfolgt die Ermittlung der fixen Marktprämie nicht durch den Gesetzgeber, sondern in Form von Ausschreibungen. Dies ergänzt das Verfahren um eine weitere wettbewerbliche Komponente, um möglichst unabhängig von Fördergeldern wirtschaften zu können.

E. Steuerliche Förderungen und Investitionshilfen

Mit diesem Instrument wird Einfluss auf Investitionsentscheidungen genommen, in dem Neuerrichtungen oder Modernisierungen von Altanlagen bezuschusst werden. Ziel dieses Instruments ist vor allem die Erhöhung der Erzeugungskapazität, während der Betrieb der Anlage den üblichen Marktbedingungen unterliegt.

F. Quotensystem mit Zertifikatshandel

In diesem System werden die Marktteilnehmer zur Erfüllung bestimmter Erzeugungsquoten gezwungen. Wettbewerb wird dadurch erzeugt, dass handelbare Zertifikate eine bilanzielle Erfüllung der vorgegebenen Quoten ermöglichen, selbst wenn ein tatsächlicher Betrieb der Anlage nicht sinnvoll ist.

Je nach derzeitiger Markt- und Ausbausituation kamen in der Vergangenheit einzelne oder mehrere dieser Instrumente zum Einsatz. Eine weitere zukünftige Umstellung der Kraftwerke auf KWK-Prozesse wird nur durch fortgesetzte Anpassung der Förderinstrumente und gesetzlichen Rahmenbedingungen erfolgen. Dabei darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass die KWK als Brückentechnologie mit zunehmender Umstellung auf erneuerbare Energien an Bedeutung verlieren wird. Zukunftsfähige Konzepte zur emissionslosen Strom- und Wärmeversorgung müssen deshalb parallel entwickelt und umgesetzt werden, um einen rechtzeitigen Ausstieg aus der fossilen Energieerzeugung zu ermöglichen.

V. FAZIT UND AUSBLICK

Die Fern- und Nahwärme hat sich in ihrer langen Geschichte in mehreren Stufen weiterentwickelt und soll nun neben einer sicheren, effizienten und komfortablen Wärmeversorgung auch verstärkt zur Erreichung der Ziele der Energiewende beitragen. Die zentrale Fernwärmeversorgung hat jedoch in der heutigen Ausführung einen starken Nachholbedarf in Bezug auf Emissionswerte der Energieträger. Am Beispiel Hamburg zeigt sich, dass die Fernwärme immer noch mehrheitlich auf fossilen Brennstoffen basiert, auch wenn bereits ein Kohleausstieg beschlossen ist und mehrere Projekte unter Hochdruck an einer Modernisierung des Systems arbeiten. Sollte ein nachhaltiger Umbau gelingen, so bietet die Fernwärme, dann wahrscheinlich in einer mehr dezentralen, flexibleren Ausführung, ein enormes Potenzial, die immer noch hohen CO_2-Emissionen im Wärmesektor soweit zu reduzieren, dass sie dem Trend im Stromsektor folgen. Ohne eine immense Kraftanstrengung zur breiten Umstellung auf regenerative Energieträger droht dieser erhoffe Erfolg aber auszubleiben. Neben einer technischen Weiterentwicklung ist es auch von großer Bedeutung, dass die Bundesregierung und auch die Landesregierungen die Potenziale der Fernwärme erkennen und über die Gesetze und Förderinstrumente vorantreiben. Potenziale liegen hierbei zum einen im Neuanschluss an Neubauten und Bestandsgebäude, wobei vor allem eine Reduzierung von herkömmlichen Zentralheizungen im Vordergrund stehen sollte. Zum anderen ist auch ein weiteres Fortführen der energetischen Sanierungen im Netz und im Gebäudebestand wichtig, um die Energieeffizienz zu steigern und somit die Fernwärmevorlauftemperatur weiter zu senken.

Durch die Umstellung der beiden Großkraftwerke Tiefstack und Wedel auf eine gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung wurde bereits vor vielen Jahren der Grundstein für eine umfassende Fernwärmeversorgung des Hamburger Stadtbereichs gelegt. Die kontinuierliche Erweiterung um kleinere dezentrale BHKW ermöglicht die Erschließung zusätzlicher Kapazitäten in der Fernwärme-versorgung mit KWK-Anlagen. Diesen Sektor gilt es mit klimafreundlichen Modellen weiter auszubauen, denn Großkraftwerke können nur noch für eine begrenzte Zeit Wärmeleistung erbringen. Der beschlossene Kohleausstieg wird auch eine Abschaltung großer KWK-Erzeugungs-anlagen zur Folge haben, deren Wärmeerzeugung dann im Fernwärmenetz fehlt. Damit einerseits der Kohleausstieg nicht gefährdet wird, aber andererseits die klimafreundliche Versorgung mit Wärme sichergestellt bleibt, müssen hier zeitnah entsprechende attraktive Marktanreize geliefert werden. Hier ist die Politik gefragt, um die Umstellung alter Anlagen sowie die klimaeffiziente Umsetzung bei Neubauten auch finanziell sinnvoll zu gestalten.

LITERATUR

[1] BDEW Bundesverband der Energie-und Wasserwirtschaft e.V, „Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland," 29 04 2019. [Online]. Available: https://www.bdew.de/media/documents/20190529_Waermeverbrauchsanalyse-Foliensatz-2019_42oo8Va.pdf. [Zugriff am 03 11 2020].

[2] T. Schütte, Leitungsgebundene Energieversorgung in Mittel- und Osteuropa, Heidelberg: Springer Nature, 2019.

[3] BDEW Bundesverband der Energieund Wasserwirtschaft e.V., „Wie heizt Deutschland 2019? BDEW-Studie zum Heizungsmarkt," BDEW Bundesverband der, Berlin, 2019.

[4] Bundesminsiterium für Wirtschaft und Energie, „Erneuerbare Energien," 2020. [Online]. Available: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html. [Zugriff am 03 11 2020].

[5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz," 2020. [Online]. Available: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Recht-Politik/Das_EEWaermeG/das_eewaermeg.html. [Zugriff am 03 11 2020].

[6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Wärme aus Erneuerbaren: das Marktanreizprogramm (MAP) für Privatpersonen, Unternehmen und Kommunen," 2020. [Online]. Available: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Foerderung/Marktanreizprogramm/marktanreizprogramm.html. [Zugriff am 03 11 2020].

[7] Umwelt Bundesamt, „Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme," 16 03 2020. [Online]. Available: https://umweltbundesamt.de/print/42350Energieverrbauch für fossile und erneuerbare Wärme. [Zugriff am 15 10 2020].

[8] DREWAG - Stadtwerke Dresden GmbH, „KWKG-Umlage," 2020. [Online]. Available: https://www.drewag.de/wps/portal/drewag/cms/menu_main/geschaeftskunden/service/sparen-gewusst-wie/stromkosten-sparen/kwkg-umlage. [Zugriff am 03 11 2020].

[9] D. Schulz und T. Weiß, „Technischer Klimaschutz," in *Hamburger Klimabericht*, Berlin, Springer Nature, 2018, pp. 283-292.

[10] eurostat, „Renewable energy for heating and cooling," 11 02 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20200211-1?inheritRedirect=true&redirect=%2Feurostat%2F. [Zugriff am 03 11 2020].

[11] Wärme Hamburg GmbH, „Unternehmensprofil," 2020. [Online]. Available: https://waerme.hamburg/ueber-uns/unternehmensprofil. [Zugriff am 03 11 2020].

[12] Hamburg Institut, „Erneuerbare Energien im Fernwärmenetz Hamburg," HIC Hamburg Institut Consulting GmbH, Hamburg, 2016.

[13] Wärme Hamburg GmbH, „Erzeugungsanlagen & Netz," 2020. [Online]. Available: https://waerme.hamburg/erzeugungsanlagen. [Zugriff am 25 10 2020].

[14] M. Beimel, K. Grobecker und E. Verg, Stadt am Strom, 100 Jahre Strom und Fernwärme in Hamburg, Hamburg: Hamburger Electricitäts-Werke Aktiengesellschaft, 1994.

[15] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund und B. V. Mathiesen, „4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into the future sustainable energy systems," *Energy*, Bd. 68, pp. 1-11, 2014.

[16] P. Konstantin, Praxisbuch Fernwärmeversorgung, Heidelberg: Springer Nature, 2018.

[17] Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, „Meilenstein für den Klimaschutz Kohleverbrennung im Kraftwerk Wedel wird deutlich reduziert," 26 10 2020. [Online]. Available: https://www.hamburg.de/pressearchiv-fhh/14517780/2020-10-26-bukea-kraftwerk-wedel/. [Zugriff am 03 11 2020].

[18] Wärme Hamburg GmbH, „Energiepark Hafen," 2020. [Online]. Available: https://energiepark-hafen.hamburg/impressum/. [Zugriff am 03 11 2020].

[19] HAMBURG ENERGIE GmbH, „IW³ – Integrierte WärmeWende Wilhelmsburg," 2020. [Online]. Available: https://www.hamburgenergie.de/ueber-uns/unternehmen/forschungsprojekte/iw3/. [Zugriff am 03 11 2020].

[20] Wärme Hamburg GmbH, „Städtische Netzgesellschaften planen Energienetze der Zukunft," 16 09 2020. [Online]. Available: https://waerme.hamburg/presse/pressemitteilungen/energienetze-der-zukunft. [Zugriff am 03 11 2020].

[21] P. Konstantin, Praxisbuch Energiewirtschaft, Berlin: Springer Verlag, 2009.

[22] T. Nussbaumer, Planungshandbuch Fernwärme, Zürich: Bundesamt für Energie, 2018.

[23] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Evaluierung der Kraft-Wärme-Kopplung," Berlin, 2019.

[24] F. Sensfuß, G. Deac, C. Bernath und K. Grave, „Vorabanalyse Langfristige Rolle und Modernisierung der Kraft-Wärme-Kopplung," Fraunhofer ISI, Karlsruhe, 2017.

[25] Umweltbundesamt, „Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)," Statistisches Bundesamt, 26 02 2020. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraft-waerme-kopplung-kwk#kwk-anlagen. [Zugriff am 03 11 2020].

[26] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Strom 2030: Langfristige Trends - Aufgaben für die kommenden Jahre," Berlin, 2017.

[27] „Heizkraftwerk Moorburg - eines der modernsten und effizientesten Kraftwerke in Europa," Vattenfall, [Online]. Available: https://powerplants.vattenfall.com/de/moorburg. [Zugriff am 05 11 2020].

[28] „Ein Blockheizkraftwerk für das Wohngebiet Neuallermöhe-West," Umweltbehörde Freie und Hansestadt Hamburg, [Online]. Available: https://eneratio.de/uploads/czUmgTpr/bhkw_allermoehe.pdf. [Zugriff am 11 05 2020].