

Brennstoffe

KWK-Anlage

Strom & Wärme

HINTERGRUND // NOVEMBER 2020

Status quo der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland

Sachstandspapier

Impressum

Ressortforschungsplan des Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet I 2.4, II 4.1, III 2.1, V 1.2, V1.3, V 1.4, V 3.1
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt

Autoren:

Sebastian Briem, Rolf Beckers, Ramona Bunkus,
Christian Fabris, Frank Hoffmann, Caren Herbstritt,
Katja Hofmeier, Juri Krack, Anja Nowack, Stefan Rother,
Jens Schuberth, Joscha Steinbrenner, Rainer Sternkopf,
Herwig Unnerstall, Carla Vollmer

Abschlussdatum:

Oktober 2020

Redaktion:

Fachgebiet Energieeffizienz
Caren Herbstritt

Satz und Layout:

le-tex publishing services GmbH

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

Titel: Shutterstock/nostal6ie

Stand: November 2020

ISSN 2363-829X

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autorinnen und Autoren.

HINTERGRUND // NOVEMBER 2020

Status quo der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland

Sachstandspapier

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
Zusammenfassung	8
Summary	8
1 Einleitung	9
2 Einordnung der KWK in das heutige Energiesystem	11
2.1 Überblick über Techniken und Anwendungsbereiche der KWK	11
2.2 Der Beitrag der KWK in einem sich wandelnden Energiesystem	12
2.3 Status Quo der Energieerzeugung aus KWK	13
3 Umweltentlastung und andere Umwelteffekte der KWK	18
3.1 Der Klimaschutzbeitrag der KWK	18
3.2 Weitere Umwelteffekte der KWK	23
4 Der politische Rahmen und die Förderung der KWK	27
4.1 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz	27
4.2 Gesetzliche Regelungen der Stromerzeugung mit Bezug zur KWK	34
4.3 Förderprogramme zur Effizienzsteigerung mit Bezug zur KWK	36
4.4 Gesetzliche Regelungen der Nachfrageseite mit Bezug zur KWK	37
4.5 Die Rolle der KWK im Europäischen Emissionshandel	38
5 Ausblick: Merkmale des Energiesystems in 2050 und die zukünftige Rolle der KWK	39
6 Quellenverzeichnis	42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der KWK-Nettostromerzeugung nach Energieträgern von 2003–2018 im Vergleich mit den Ausbauzielen.....	15
Abbildung 2: Entwicklung der KWK-Nettowärmeerzeugung nach Energieträgern von 2003–2018	16
Abbildung 3: Treibhausgasemissionen für die Versorgung einer Siedlung mit Strom und Wärme	17
Abbildung 4: Spanne der CO ₂ -Einsparung der KWK Erzeugung	20
Abbildung 5: CO ₂ -Emissionen des Brennstoffeinsatzes in KWK-Anlagen 2003–2018	21
Abbildung 6: Energetische Potenziale der Abfall- und Reststoffe, die dem Energiesystem insgesamt in 2020 zur Verfügung stehen (in Prozent, bezogen auf 900 PJ Primärenergie).....	26
Abbildung 7: Anzahl der beim BAFA zugelassenen neuen, modernisierten und nachgerüsteten KWK-Anlagen nach elektrischer Leistung und Inbetriebnahmejahr.....	28
Abbildung 8: Zulassung von Wärme- und Kältenetze nach dem KWKG. Zulassung je Inbetriebnahmejahr	30
Abbildung 9: Anzahl der Wärmespeicher nach Größenklassen und Jahr der Inbetriebnahme.....	31
Abbildung 10: Schematische Darstellung des iKWK-Modell-Systems.....	32
Abbildung 11: Entwicklung der Fernwärmeversorgung.....	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Quantitative Ziele der Energiewende und Status quo (2017)	10
Tabelle 2: Typische KWK-Techniken	12
Tabelle 3: Schwellen der Genehmigungsbedürftigkeit von Feuerungsanlagen nach 4. BImSchV und Regelungsbereich innerhalb der BImSchV	23
Tabelle 4: NO _x -Anforderungen für Klein-BHKW bis 50 kW _{el} nach Ökodesign-Richtlinie	25
Tabelle 5: Zuschläge nach dem KWKG (2020)	28
Tabelle 6: Ergebnisse der Ausschreibungsrunden für konventionelle KWK-Anlagen.....	33
Tabelle 7: Ergebnisse der Ausschreibungsrunden für iKWK-Anlagen.....	35

Abkürzungsverzeichnis

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BEG	Bundesförderung effiziente Gebäude
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
CH₄	Methan
CO₂	Kohlenstoffdioxid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU-ZuVO	Europäische Zuteilungsverordnung
gCO₂	Gramm Kohlenstoffdioxid
GEG	Gebäudeenergiegesetz
ggü.	gegenüber
GuD-Turbine	Gas- und Dampf-Turbine
iKWK	Innovative Kraft-Wärme-Kopplung
KOM	Europäische Kommission
kW	Kilowatt
kW_{el}	Kilowatt elektrisch
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
MW	Megawatt
MW_{el}, bzw. th.	Megawatt elektrisch, bzw. thermisch
NO_x	Stickstoffoxide
O₂	Sauerstoff
ORC	Organic Rankine Cycle
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
SCR	Selektive Katalytische Reduktion
TALärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
TEhG	Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz
tCO₂	Tonne Kohlenstoffdioxid
THG	Treibhausgas
TWh	Terawattstunde
vNNE	vermiedene Netznutzungsentgelte
ZuG	Zuteilungsgesetz

Zusammenfassung

Um den globalen Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen und die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C zu begrenzen, hat die Bundesregierung sich verschiedene Klima- und Umweltschutzziele gesetzt. Der Beitrag des Energiesektors ist von herausragender Bedeutung, um das Ziel der Treibhausgasneutralität für Deutschland bis 2050 zu erreichen. Dabei steht der Sektor vor tiefgreifenden Veränderungen. Mit dem Energiekonzept der Bundesregierung werden die Ziele verfolgt, die Treibhausgasemissionen zu senken, die Energieversorgung auf erneuerbare Energien umzustellen und den Primärenergieverbrauch bis 2050 um 50 % zu reduzieren.

Durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme leisten Kraft-Wärme-Kopplungs-Techniken (KWK) einen Beitrag zur effizienten Energienutzung und damit zur Energiewende. Seit nunmehr 18 Jahren werden darum durch das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) Techniken zur effizienten Erzeugung von Strom und Wärme gefördert, um durch die gekoppelte Erzeugung Brennstoff und Kohlenstoffdioxid (CO₂) einzusparen. Die mit der KWK-Förderung verbundenen Ausbauziele für 2020 wurden erreicht und sind ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg der Energie-

wende. Das vorliegende Sachstandspapier nimmt diesen Meilenstein und die aktuelle Novellierung des KWKGs zum Anlass, um einen faktenbasierten Sachstand zum Status quo der KWK in Deutschland vorzulegen.

Das Thema KWK ist vielschichtig, denn eine ganze Reihe verschiedener Techniken unterschiedlicher Anlagengrößenklassen, angetrieben von verschiedenen fossilen und erneuerbaren Brennstoffen, kommen in den Anwendungsbereichen der öffentlichen Energieversorgung, der Industrie und der Objektversorgung zum Einsatz. Dabei entwickelt sich die Strom- und Wärmeerzeugung aus KWK insgesamt positiv. Dadurch konnte die KWK einen bedeutenden Klimaschutzbeitrag leisten. Trotz der Kohlenstoffdioxid- und Primärenergieeinsparung verursacht die Verbrennung fossiler Energieträger auch in KWK-Anlagen weiterhin Treibhausgasemissionen sowie Luftschadstoff- und Geräuschmissionen. Der Ausbau der KWK erfolgte vornehmlich im Rahmen des KWKGs, doch beeinflussen auch andere Gesetze und Maßnahmen die Entwicklung der KWK auf der Angebots- und der Nachfrageseite. Diese vielfältigen Aspekte tragen zum heutigen Status quo der KWK bei, die sich an ein stark wandelndes Energiesystem anpassen muss.

Summary

In order to meet the global challenges of climate change and to limit global temperature increase to well below 2 °C and ideally to no more than 1.5 °C compared to the pre-industrial level, the Federal Government has set various climate and environmental goals. The contribution of the energy sector is of paramount importance in achieving greenhouse gas neutrality for Germany by 2050. The energy sector is facing far-reaching changes. The Federal Government's energy concept pursues the goals of reducing greenhouse gas emissions, switching energy supply to renewable energies and reducing primary energy consumption by 50 % by 2050.

Through the simultaneous generation of electricity and heat, combined heat and power (CHP) technologies contribute to the efficient use of energy and thus to the energy transition. For 18 years the Combined Heat and Power Act (KWKG) has promoted technologies for the efficient generation of electricity and heat in order to save fuel and carbon dioxide through combined generation. The CHP expansion goals for 2020 associated with the governmental support have been achieved and present an important milestone on the pathway of the energy transition. The present paper takes this milestone and the current amendment of the KWKG as an opportunity to present a fact-based assessment of the status quo of CHP in Germany.

The issue of cogeneration is multifaceted, because a range of different technologies for various plant sizes, driven by different fossil and renewable fuels, are used in public, industrial and decentralised object energy supply. Overall, electricity and heat generation from cogeneration is developing positively. This enabled CHP to make a significant contribution to climate protection. Despite the carbon dioxide and primary energy savings, combustion based on fossil

fuels continues to result in CO₂ emissions as well as air pollutants and noise imissions. The expansion of cogeneration took place primarily within the framework of the KWKG, however other laws and policies also influence the development of cogeneration both on the supply and demand side. These diverse aspects contribute to the current status quo of CHP, while CHP has to adapt to a rapidly changing energy system.

1 Einleitung

Um den globalen Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen und die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C zu begrenzen hat, die Bundesregierung sich verschiedene Klima- und Umweltschutzziele gesetzt. Mit dem Klimaschutzplan 2050 wurden bis 2030 sektorale Beiträge zur Treibhausgasminde rung definiert, die mit jahres- und sektorscharfen Treibhausgasminde rungszielen im Bundes-Klimaschutzgesetz rechtlich verankert wurden. Dabei ist der Beitrag des Energiesektors von herausragender Bedeutung, um das Ziel der Treibhausgasneutralität für Deutschland bis 2050 zu erreichen. Im Energiesektor wurden in den vergangenen Jahren große Anstrengungen unternommen, um die Energiewende anzustoßen und umzusetzen.

Durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme leisten Kraft-Wärme-Kopplungs-Techniken einen Beitrag zur Energiewende. Dabei ist die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in die quantitativen Ziele der Energiewende gebettet, die Treibhausgasemissionen zu senken, den Anteil der erneuerbaren Energien zu steigern und den Primärenergieverbrauch zu reduzieren (Tabelle 1).

Seit nunmehr 18 Jahren werden daher durch das „Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung“ (KWKG) Techniken zur effizienten Erzeugung von Strom und Wärme gefördert, um durch die gekoppelte Erzeugung Brennstoff und Kohlenstoffdioxid (CO₂) einzusparen. Die mit der KWK-Förderung verbundenen Ausbauziele für 2020 wurden erreicht und stellen einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg der Energiewende dar.

Die Erreichung dieses Meilensteins und die aktuelle Novelle des KWKGs sind Anlass für das Umweltbundesamt, die positive Entwicklung der KWK nach zu zeichnen und mit dem aktuellen Sachstand zu unterlegen, um die Rolle der KWK im Rahmen der Energiewende, aber auch der breiteren Diskussion über die Beiträge zur den Klimaschutzzielen, einzuordnen. Denn der Vorteil der KWK ergibt sich aus dem Nachteil der ineffizienteren ungekoppelten Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. Mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien im Energiesystem schrumpft dieser Vorteil jedoch. Zudem ändern sich in einem durch Fluktuationen geprägten Energiesystem die Anforderungen an die konventionelle Erzeugung. Hier kann und soll KWK mehr noch als in der Vergangenheit zur Flexibilisierung beitragen, um die Integration volatiler erneuerbarer Energien in das Energiesystems zu steigern. In einem von tiefgreifenden Veränderungen geprägten Sektor ist die KWK auf der Suche nach ihrer Rolle im künftigen Energiesystem.

Mit diesem Sachstandspapier soll eine datenbasierte Orientierung für diese Suche gegeben werden, in dem es die Entwicklungen der vergangenen Jahre im Bereich KWK dargestellt. Gleichzeitig wird die KWK in die Vielzahl an damit verbundenen Fragestellungen, auch im Bereich des Umweltschutzes, eingeordnet. Das Sachstandspapier soll dabei der Leserin und dem Leser als allgemeinverständliches Nachschlagewerk dienen, das einen Überblick über die relevanten Entwicklungen gibt, die zum Status quo der Effizienztechnik KWK geführt haben.

Tabelle 1

Quantitative Ziele der Energiewende und Status quo (2017)

	2017	2020	2030	2040	2050
Treibhausgasemissionen					
Treibhausgasemissionen (ggü. 1990)	-27,50 %	mind. -40 %	mind. -55 %	mind. -70 %	weitgehend treibhausgasneutral -80 bis 95 %
Erneuerbare Energien					
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	15,90 %	18,00 %	30,00 %	45,00 %	60,00 %
Anteil am Bruttostromverbrauch	36,00 %	mind. 35 %	mind 50 % EEG 2017: 40 bis 45 % bis 2025	mind 65 % EEG 2017: 55 bis 60 % bis 2035	mind. 80 %
Anteil am Wärmeverbrauch	13,40 %	14,00 %			
Effizienz und Verbrauch					
Primärenergieverbrauch (ggü. 2008)	-5,50 %	-20,00 %	—————>		-50,00 %
Endenergieproduktivität (2008–2050)	1 % pro Jahr (08–17)	2,1 % pro Jahr (2008–2050)			
Bruttostromverbrauch (ggü. 2008)	-3,30 %	-10,00 %	—————>		-25,00 %
Primärenergieverbrauch Gebäude (ggü. 2008)	-18,80 %	—————>			-80,00 %
Wärmebedarf Gebäude (ggü. 2008)	-6,90 %	-20,00 %			
Endenergieverbrauch Verkehr (ggü. 2005)	6,50 %	-10,00 %	—————>		-40,00 %

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von BMWi (2019a) und (2019b)

Das Thema KWK ist vielschichtig, denn eine ganze Reihe verschiedener Techniken unterschiedlicher Anlagengrößenklassen, angetrieben von verschiedenen fossilen und erneuerbaren Brennstoffen werden in den Anwendungsbereichen der öffentlichen Energieversorgung, der Industrie und der Objektversorgung eingesetzt (Kapitel 2). Dabei entwickelt sich die Strom- und Wärmeerzeugung aus KWK insgesamt positiv (Kapitel 3). Dadurch konnte die KWK einen bedeutenden Klimaschutzbeitrag leisten. Trotz der Kohlenstoffdioxid- und Primärenergieeinsparung

verursacht die Verbrennung fossiler Energieträger weiterhin Treibhausgasemissionen sowie Luftschadstoff- und Geräuschmissionen (Kapitel 3). Der Ausbau der KWK erfolgte vornehmlich im Rahmen des KWKGs, doch beeinflussen andere Gesetze und Maßnahmen die Entwicklung der KWK auf der Angebots- und der Nachfrageseite (Kapitel 4). All diese Aspekte tragen zum heutigen Status quo der KWK bei, die sich zukünftig an ein sich stark wandelndes Energiesystem anpassen muss (Kapitel 5).

2 Einordnung der KWK in das heutige Energiesystem

2.1 Überblick über Techniken und Anwendungsbereiche der KWK

Zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme – zunehmend auch Kälte – stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken zur Verfügung: Motoren (Stirlingmotor und Verbrennungsmotor) sowie Turbinen (Gasturbine, Dampfturbine und Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD), sowie Mikrogasturbinen). Weiter werden Brennstoffzellen sowie ORC- und Kalina-Cycle-Verfahren in KWK-Anlagen eingesetzt.

Unter dem Begriff des Blockheizkraftwerks (BHKW) werden häufig Verbrennungsmotoren, Mikrogasturbinen, Stirlingmotoren und Brennstoffzellen zusammengefasst. BHKW spielen insbesondere in der dezentralen öffentlichen Versorgung zunehmend eine Rolle.

Typische Anlagengrößen für die Objektversorgung liegen zwischen 1 kW und 50 kW (LBD, 2015) elektrischer Leistung. Im gewerblichen Bereich (etwa Hotels, Freizeitbäder, Krankenhäusern) werden typischerweise Anlagengrößen bis 1000 kW_{el} realisiert. Im Bereich der Objektversorgung werden vor allem Verbrennungs- und Stirlingmotoren eingesetzt. Vor wenigen Jahren dominierte noch die Stirlingmotoren den KWK-Bereich bis 3 kW_{el}. Inzwischen dominiert in diesem Leistungsbereich die Brennstoffzellenheizung den KWK-Markt. Brennstoffzellen kommen vorrangig im Wohngebäudebereich zum Einsatz.

Verbrennungsmotoren, die durch Kaskadierung mehrerer Motoren-Module höhere Leistung erreichen, werden neben der Objekt- und Industrierversorgung in der öffentlichen Versorgung eingesetzt. Dampf- und Gasturbinen sowie Gas- und Dampf-Turbinen-Kraftwerke (GuD) finden insbesondere in den großen Anlagenklassen Anwendung (Prognos et al., 2019). Die Energiebedarfe der Industrie werden typischerweise durch Anlagen der Größenklassen zwischen 500 kW_{el} – 20 MW_{el} gedeckt. Industrielle KWK-Anlagen mit darüber hinausgehender Leistung findet man vorrangig in der chemischen Industrie und der Papierindustrie. In der öffentlichen Versorgung kommen typischerweise Anlagen zwischen 10 MW_{el} – 800 MW_{el} zum Einsatz. Anlagen mit geschlossenen

sekundären Dampfkreisläufen (ORC- und Kalina-Technik) werden in der Regel ebenfalls mit geringer Anlagenleistung genutzt.

Tabelle 2 gibt zudem Aufschluss über den Anteil und die elektrische Leistung der zugelassenen und durch das KWKG geförderten Anlagen. Verbrennungsmotoren machen hinsichtlich der Anlagenzahl dabei den Löwenanteil der zugelassenen Anlagen aus (~97%). Doch ist die damit verbundene elektrische Leistung mit ~3,200 MW_{el} gegenüber etwa den leistungsstarken GuD-Kraftwerken mit rund 4.100 MW_{el} verhältnismäßig klein. Dabei machen GuD-Anlagen nur 0,43 % der zugelassenen Anlagen aus.

Je nach Art der Anlage können für KWK-Anlagen alle Brennstoffe mit einem Mindestenergiegehalt wie Gase, Kohlen, Mineralöle, feste und flüssige Biomasse, Abfälle und Ersatzbrennstoffe verwendet werden. Zukünftig könnte auch Wasserstoff eingesetzt werden. Je nach Brennstoff unterscheiden sich auch die Kohlendioxid-Emissionen des KWK-Anlagen-Betriebes erheblich.

Es wird zwischen einer strom- (Betriebsweise auf den Strompreis ausgerichtet) und wärmegeführten (Betriebsweise auf Wärmebedarf ausgerichtet) Auslegung der KWK-Anlage unterschieden, je nachdem welche Betriebsweise priorisiert wird. Bei einer gesamtoptimierten Betriebsweise wird die Anlage so eingesetzt, dass sie sich sowohl am Strompreis als auch am Wärmebedarf orientiert. Die Auslegung hängt vom Lastprofil der Nachfrage ab. Während große Anlagen der öffentlichen Versorgung häufig stromgeführt gefahren werden, überwiegt in der Industrie die Wärmeerzeugung, sodass die Anlagen wärmegeführt ausgelegt sind (Prognos et al., 2019). Hieraus lassen sich unterschiedliche Geschäftsmodelle für den KWK-Betrieb ableiten.

Die Hauptprodukte und Erlösquellen von KWK-Anlagen sind der erzeugte Strom und die erzeugte Nutzwärme. Je nach Anwendungsfall und Geschäftsmodell werden Strom und Wärme entweder vor Ort direkt oder über Netze selbst genutzt oder die Energie wird an Dritte verkauft.

Tabelle 2

Typische KWK-Techniken

	Verbrennungsmotor	Stirlingmotor	Brennstoffzelle	Dampfturbine	Gasturbine	GuD Turbinen-Kraftwerk
Anwendungsbereich	Objektversorgung, Industrie, öffentliche Versorgung	Objektversorgung	Objektversorgung, Industrie	Industrie	Industrie	Industrie, öffentliche Versorgung
Elektrische Leistung	1 kW bis 10 MW pro Modul (mehrere möglich)	1 kW bis 9 kW	0,7 kW bis 2,8 MW	ab 100 kW	ab 500 kW	ab 20 MW
Elektrischer Wirkungsgrad (Netto-Nenn) (in %)	25 bis 45	15 bis 25	34 bis 60	10 bis 25	25 bis 38	35 bis 50
Gesamtwirkungsgrad (in %)	bis rund 100	bis rund 95	bis rund 90	bis rund 90	bis rund 85	bis rund 90
Anteil an zugelassenen KWK-Anlagen nach KWKG* (in %)	96,94	0,21	0,06	0,44	0,03	0,43
el. Leistung der zugelassenen KWK-Anlagen nach KWKG in MW	3.178,51	0,09	4,38	1.324,71	475,07	4.124,19

*Differenz zu 100%: Sonstige

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Prognos et al. (2019) und BAFA (2020a)

Typische Anwendungsfälle sind in der Objektversorgung – etwa von Ein- und Mehrfamilienhäusern, Krankenhäusern, Hotels – die Eigenversorgung mit Strom und Wärme vor Ort, wobei der Strom teilweise in ein Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist wird. Im Bereich der industriellen KWK werden im Fall der Eigenversorgung Strom und Wärme vor Ort zu großen Teilen selbst genutzt. Im Falle eines Industrieparks werden Strom und Wärme aber auch über eigene Verteilnetze oder öffentliche Netze an Dritte geliefert. In der Praxis gibt es insbesondere in der Industrie Einzelfälle, in denen die KWK-Anlagen stark abweichend vom typischen Fall ausgelegt oder betrieben werden. Teilweise werden signifikante Energiemengen industrieller KWK in Strom- und Wärmenetze der öffentlichen Versorgung eingespeist (Prognos et al., 2019). In der öffentlichen Versorgung werden Strom und Wärme in öffentliche Netze eingespeist und an Dritte geliefert.

2.2 Der Beitrag der KWK in einem sich wandelnden Energiesystem

Der heutige Strommarkt ist gekennzeichnet durch einen steigenden Anteil erneuerbarer Energien. Die verstärkte Nutzung von Wind- und Solarenergie hat zur Konsequenz, dass die Erzeugung fluktuiert und zeitlich kurzfristigen Schwankungen unterliegt. Die Residuallast – also die Differenz zwischen Stromnachfrage und fluktuierendem Angebot auf der Basis von erneuerbaren Energien – wird durch steuerbare Erzeugung aus konventionellen Kraftwerken gedeckt. Dabei korreliert die Residuallast in etwa mit der Höhe des Strompreises am Strommarkt.

Die Anforderungen an Kraft- und Heizkraftwerke, die fossile Brennstoffe nutzen, haben sich im gegenwärtigen Energiesystem somit geändert. Sie müssen in der Lage sein, schnell und flexibel auf Angebotsschwankungen zu reagieren. Das bedeutet,

dass Anlagen stromsystemdienlich gefahren werden müssen. KWK-Anlagen leisten heute einen Beitrag zur Brennstoff- und CO₂-Einsparung dort, wo sie ungekoppelte Kohle- oder Gaskraftwerke bei der Deckung der Residuallast verdrängen. Maßgebend muss dabei sein, dass mit dem Stromangebot aus gekoppelter Erzeugung keine erneuerbaren Energien aus dem Markt gedrängt werden, wie es heute teilweise der Fall ist (Prognos et al., 2019). Bei der Deckung der Residuallast ist entscheidend, dass sich das Angebot an den Strompreissignalen des Marktes orientiert, also dann Strom erzeugt wird, wenn die Preise hoch sind. Treten Netzengpässe auf, können Situationen entstehen, in denen konventionelle Kraftwerke und KWK-Anlagen trotz des positiven Strompreissignals keinen zusätzlichen Strom produzieren sollten. Die Volllaststunden, in denen KWK systemdienlich Strom erzeugt, sind damit begrenzt und werden auch zukünftig mit einem steigendem Anteil der erneuerbaren Energien weiter zurückgehen. Auch sinkt der KWK-Vorteil bei der CO₂-Einsparung mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien im Stromsystem, sodass ein Beitrag der KWK vornehmlich in der punktgenauen Deckung der Residuallast liegt.

Die Instrumente zur Förderung des strommarkt-orientierten flexiblen Kraftwerksbetriebs im KWKG bieten bereits heute einen Anreiz für eine stromsystemdienliche Fahrweise der Anlagen. Jedoch werden zum Einen lediglich 30.000 Vollbenutzungsstunden der Anlagen gefördert (vgl. Kapitel 4.1), der Anlagenbetreiber ist darüber hinaus frei, seinen Strom zu vermarkten. Zum Anderen stellen auch KWK-Anlagen Strom und Wärme am Markt bereit, die keine Förderung in Anspruch nehmen. Die Geschäftsmodelle der Anlagenbetreiber sind damit nicht zwangsweise auf eine systemdienliche Fahrweise ausgelegt, was zu einer Verdrängung von erneuerbarem Strom führen kann (s. Infobox).

Die Flexibilisierungsanforderungen an die Wärmeseite der KWK sind zum derzeitigen Stand noch gering. Der Anteil an Wärme aus erneuerbaren Energien im Wärmemarkt liegt für das Jahr 2018 bei 14,2 %, dies entspricht etwa einem Drittel der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Die Wärmeseite der KWK ist durch die leitungsgebundene Wärmeversorgung geprägt, rund 80 % der Fernwärme wird in gekoppelten Prozessen erzeugt (AGFW, 2018). Fernwärmenetze auf kommunaler Ebene bedienen dabei primär die Nachfrage von

Gebäuden nach Raumwärme und Warmwasser. Im Industriesektor ist das Wärmeverbrauchsprofil dagegen gekennzeichnet durch ein Grundlastprofil, mit dem Prozesswärme bei hohen Temperaturen erzeugt wird. Die Eigenstromversorgung ist bei industriellen Anlagen der Regelfall, die installierte elektrische Leistung ist im Vergleich zur Wärmeproduktion eher klein. Dabei ist die Anzahl der Vollbenutzungsstunden im Vergleich zur öffentlichen Versorgung hoch (Prognos et al., 2019).

2.3 Status Quo der Energieerzeugung aus KWK

Das KWKG hat unter anderem den Ausbau der KWK zum Ziel. Dabei ist die KWK-Nettostromerzeugung der wesentliche Indikator des KWK-Ausbau. Neben der KWK-Stromerzeugung ist auch die damit korrespondierende KWK-Nettowärmeerzeugung eine im Fokus stehende Größe. Auf die Veränderung dieser beiden wesentlichen KWK-Kenngrößen konzentrieren sich die nachfolgenden Darstellungen.

2.3.1 KWK-Stromerzeugung

Laut dem KWK-Ausbauziel soll die KWK-Nettostromerzeugung im Jahr 2020 mindestens 110 Terawattstunden und im Jahr 2025 mindestens 120 Terawattstunden betragen (§ 1 KWKG 2016). Im Jahr 2018 liegt die KWK-Nettostromerzeugung mit 115 Terawattstunden bereits über dem Zielwert für das Jahr 2020 (siehe Abbildung 1). Das Ausbauziel der KWK wird demnach wahrscheinlich erreicht. Die KWK-Nettostromerzeugung – gezeigt werden in Abbildung 1 die Daten unter Berücksichtigung des Eigenwärmebedarfs des Biogasanlagenfermenters¹ – ist im Zeitraum von 2003 bis 2017 kontinuierlich gestiegen. Die Verringerung im Jahr 2018 ggü. 2017 ist im Wesentlichen die Folge einer verbesserten energiestatistischen Erfassung der KWK-Anlagen ab 2018 (Baten et al., 2017).

Der Zuwachs ist insbesondere auf den verstärkten Einsatz von Biomasse (33,1 TWh in 2018) sowie auf den Zubau und einer besseren Auslastung der Erdgas-KWK-Anlagen (61,3 TWh in 2018) zurückzuführen. In KWK-Anlagen wird Biomasse vor allem in Form

¹ Entsprechend des „engen Bilanzgrenzenansatz“ gemäß des AGFW-Arbeitsblatts FW 308 gehört der Biogasanlagenfermenter – als örtlich verbundener und erweiterter Anlagenteil – nicht zur KWK-Anlage. Dementsprechend erfolgt die mit der Fermenterwärmebereitstellung korrespondierende Stromerzeugung in KWK und ist somit auch Bestandteil der KWK-Nettostromerzeugung und der KWK-Wärmeerzeugung. Der Eigenwärmebedarf einer Biogasanlage liegt bei durchschnittlich 25 % der insgesamt in der Anlage erzeugten Wärmemenge.

von Biogas eingesetzt, das zu einem dominierenden Anteil vor Ort genutzt wird. Ein geringerer Anteil wird nach einer Aufbereitung zu Biomethan (Erdgasqualität) ins Gasnetz eingespeist und dezentral im Wesentlichen in BHKW eingesetzt. Weitere Biomassefraktionen, die in KWK-Anlagen mit nahezu gleichgroßen Nutzungsanteilen eingesetzt werden, sind biogene Festbrennstoffe und Klärgas. Biomethan, Festbrennstoffe und Klärgas stellen zusammen ca. 30 % der biogenen KWK-Strom- und Wärmeerzeugung.

Die auf Steinkohle- und Mineralölen basierende KWK-Stromerzeugung ist im Zeitverlauf zurückgegangen (zusammen 13,4 TWh in 2018), der Anteil der Braunkohle an der KWK-Stromerzeugung schwankt über den Zeitverlauf um 5 TWh (4,7 TWh in 2018).

2.3.2 KWK-Wärmeerzeugung

Bei der KWK-Nettowärmeerzeugung und den eingesetzten Energieträgern zeigt sich (ebenfalls unter Berücksichtigung des Eigenwärmebedarfs der Biogasanlagen) mit einem kontinuierlichen Anstieg seit 2003 ein ähnliches Bild wie im Strombereich. Dabei stellt sich die Nettowärmeerzeugung nach Energieträgern anteilig ähnlich dar. Fossile Gase waren im Jahr 2018 der wichtigste Energieträger. Aus ihm wurden 105,6 TWh KWK-Nettowärme erzeugt. Im selben Jahr trug Biogas mit 52,5 TWh zur KWK-Wärmeerzeugung bei. Der Anteil der Stein- und Braunkohle sowie der Mineralöle ist über den gesamten betrachteten Zeitraum rückläufig. Insgesamt wurden aus diesen Energieträgern noch 57,8 TWh im Jahr 2018 erzeugt (siehe Abbildung 2).

Systemdienlichkeit

Aufgrund des steigenden Angebots an fluktuierenden erneuerbaren Energien im Energiesystem besteht zunehmend die Notwendigkeit, das Energieangebot aus steuerbaren Energieträgern daran anzupassen. Dies erfordert auch das nachfrageangepasste Einspeiseverhalten der KWK. Als systemdienliche Fahrweise bezeichnet man die an den verbleibenden Energiebedarf angepasste Erzeugung von fossilen und biogenen KWK-Anlagen. Steuerbare Energieträger sollten daher nur Strom produzieren, wenn ein Erzeugungsbedarf besteht oder die Sicherung der Netzstabilität durch die Zurverfügungstellung von Regel- und Blindleistung zu sichern ist (ÖkolInstitut, 2015). Auf der Wärmeseite ist die Erzeugung nur dann systemdienlich, wenn ein real vorhandener Wärmebedarf gedeckt wird. Da i. d. R. eine Investitionsentscheidung für KWK jedoch nur getroffen wird, wenn eine Wärmenachfrage vorhanden ist, spielt die Systemdienlichkeit hier eine geringere Rolle.

Die Flexibilitätsanforderungen nehmen durch den steigenden Anteil an erneuerbaren Energien im Stromsystem zu. In einem Energiesystem, das überwiegend durch fluktuierende erneuerbare Energien gekennzeichnet ist, werden flexibel betriebene Anlagen, die eine gesicherte Leistung erbringen können, immer dringender benötigt. Hieraus ergeben sich bereits heute Anforderungen an in Planung und Bau befindliche KWK-Anlagen, um eine angepasste Betriebsweise zum Erhalt der Systemdienlichkeit zu gewährleisten.

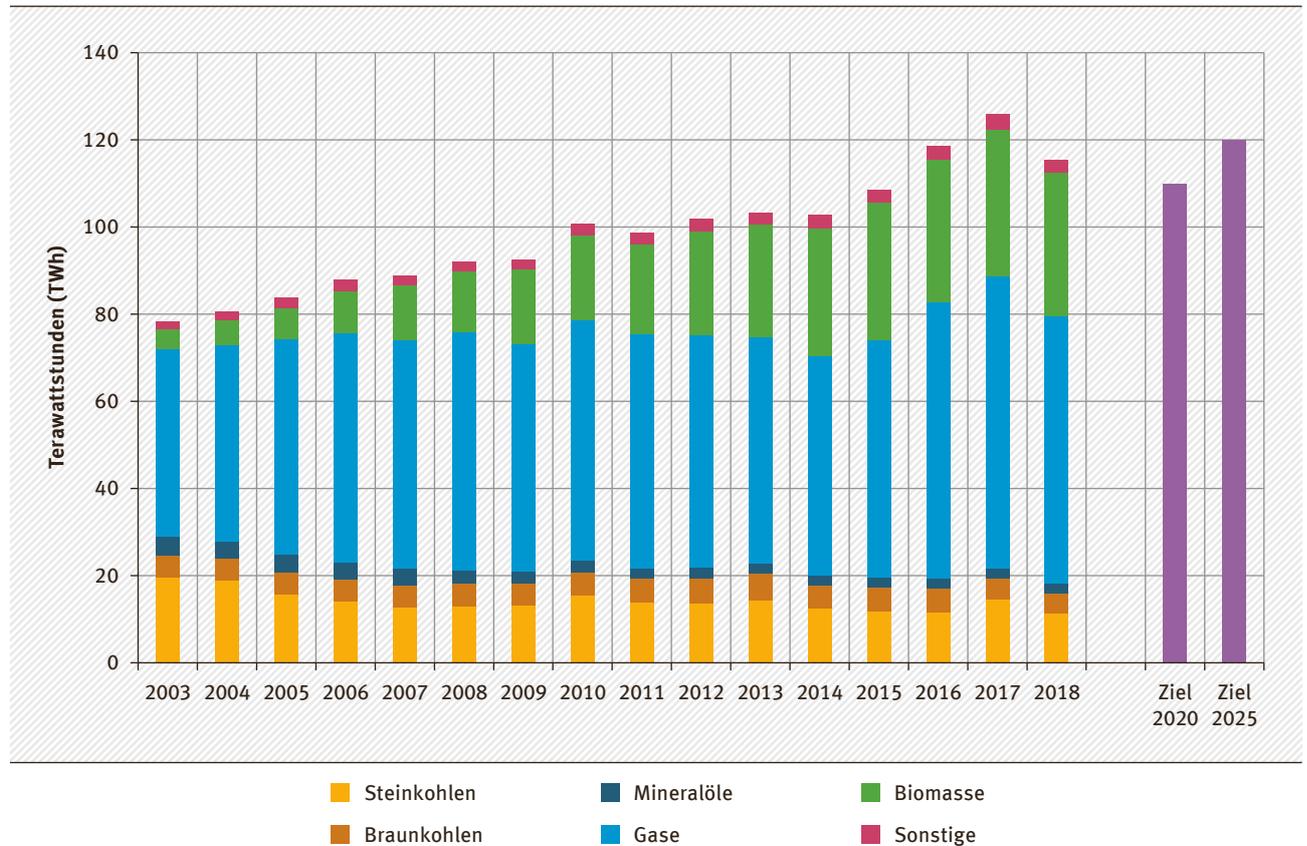
Flexibilisierungsoptionen bestehen darüber hinaus in Wärmespeichern und (teilweise) Wärmenetzen. Um die Erzeugung an den Bedarf anzupassen, erlauben Wärmespeicher eine zeitliche Loslösung der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung von der Wärmenutzung und tragen dadurch zur systemdienlichen Stromerzeugung bei.

Die Strombörse gilt als Indikator für die allgemeine Angebotsseite, die Höhe der Residuallast sowie für die Anforderung an die Flexibilisierung des Systems. Strompreissignale kommen jedoch nicht immer zum Tragen. Eine systemdienliche Fahrweise ist insbesondere im Industriesektor oftmals nicht gegeben, da KWK-Anlagen hier für die Eigenerzeugung von Strom und Prozesswärme ausgelegt werden. Bei diesen Anlagen bestehen dadurch aktuell wenig betriebliche und finanzielle Anreize strommarktorientiert zu produzieren. Des Weiteren können kleine KWK-Anlagen (< 100 kW) nach § 4 KWKG den Grundlastpreis erhalten und werden dann strommarktunabhängig betrieben.

Heizkraftwerke nehmen am Redispatch teil, werden dabei allerdings gemäß EEG und KWKG gegenüber ungekoppelten Anlagen bevorzugt behandelt und sind nur gegenüber erneuerbaren Energien weniger privilegiert. Ab Oktober 2021 wird diese Reihenfolge anhand von Faktoren in neuen Redispatch 2.0 Verfahren formalisiert werden.

Abbildung 1

Entwicklung der KWK-Nettostromerzeugung nach Energieträgern von 2003–2018 im Vergleich mit den Ausbauzielen



Quelle: Eigene Darstellung nach StaBa (2020a), (2020b), ÖkoInstitut, Umweltbundesamt /Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, Stand 11/2019

Die im Vergleich zur KWK-Nettostromerzeugung prozentual geringere Erhöhung der KWK-Nettowärmeerzeugung im Zeitverlauf bis zum Jahr 2017 ist die Folge der Errichtung zahlreicher GuD-Anlagen in den letzten Jahren, die eine überdurchschnittliche hohe Stromkennzahl aufweisen. Der Anstieg im Jahr 2018 gegenüber 2017 ist im Wesentlichen Ergebnis der seit 2018 verbesserten Erfassungsmethodik.

2.3.3 KWK-Erzeugung aus Stein- und Braunkohle

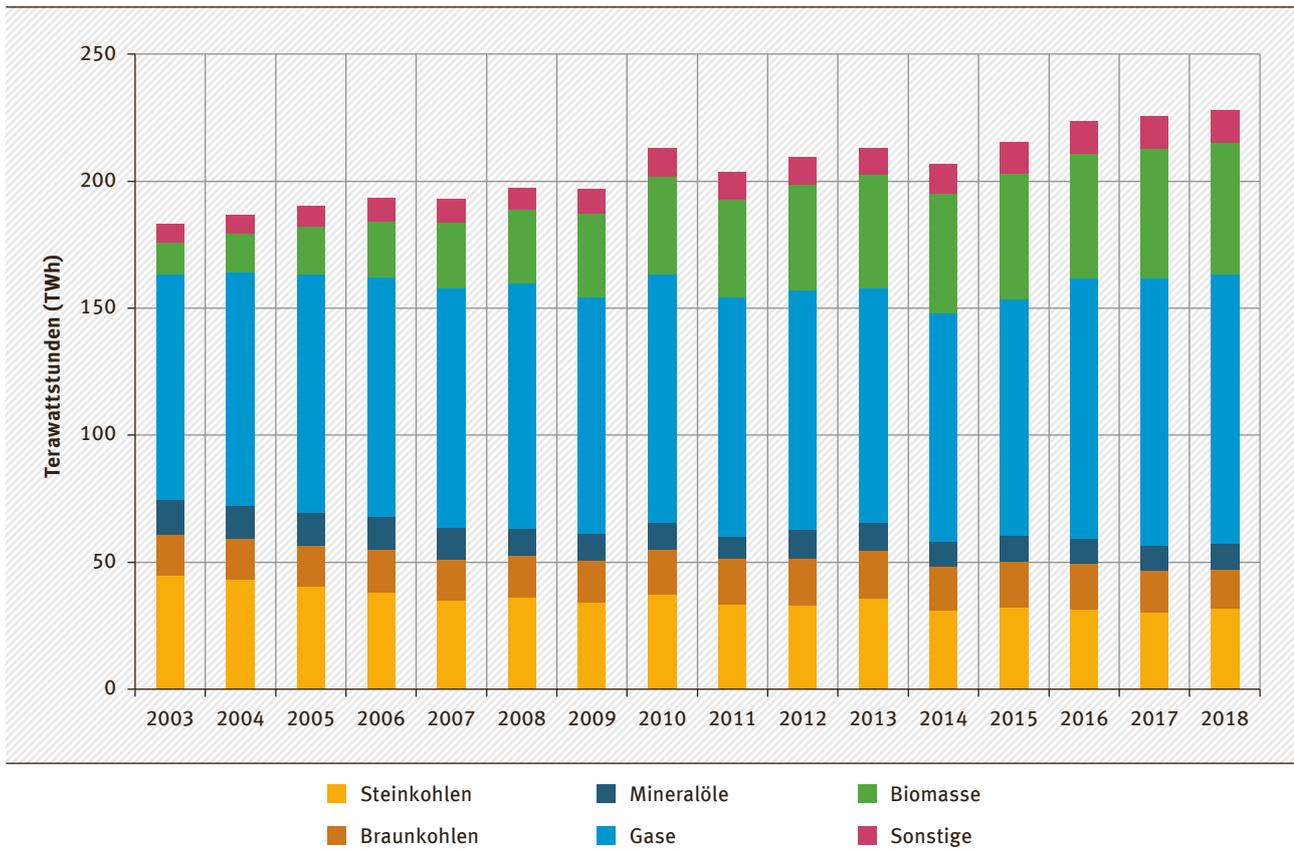
Im Jahr 2018 betrug die statistisch berichtete KWK-Wärmeproduktion aus Steinkohleheizkraftwerken 31,7 TWh. Braunkohleheizkraftwerke produzierten rund 15,5 TWh. Steinkohleheizkraftwerke produzieren überwiegend für die öffentliche Versorgung (26,5 TWh), während auf den industriellen Sektor nur 5,2 TWh entfielen. Bei den Braunkohleheizkraftwerken wurde 2018 eine Wärmeproduktion von 7,9 TWh in der öffentlichen Versorgung und 7,5 TWh in der industriellen Kraftwirtschaft statistisch erfasst (StaBa, 2020b, StaBa, 2020a). Die Wärmeproduktion

aus Braunkohle-KWK-Anlagen ist rückläufig und stammt zu etwa einem Drittel aus stromgeführten Heizkraftwerken, zu zwei Dritteln aus wärmegeführten Heizkraftwerken (Prognos et al., 2019).

Für Steinkohle-KWK-Anlagen ergibt sich ein differenziertes Bild, je nachdem ob Anlagen der öffentlichen Versorgung oder der Industrie betrachtet werden. In der öffentlichen Versorgung wird Wärme aus Steinkohle-KWK-Anlagen fast vollständig in die Fernwärmeversorgung eingespeist. Die Anlagen werden in der Regel wärmegeführt gefahren (ebenda). Die Anlagen sind geographisch relativ gleichmäßig über Deutschland verteilt. Etwa die Hälfte der Steinkohle-KWK-Anlagen der öffentlichen Versorgung wurde vor 1990 errichtet. Dagegen weist das Wärmeverbrauchsprofil von industriellen Steinkohle-KWK-Anlagen ein Grundlastprofil auf, wobei die Eigenstromversorgung der Regelfall ist. Hauptstandorte der Steinkohle-KWK-Anlagen liegen am Rhein, häufig in Nordrhein-Westfalen. Der überwiegende Teil der Anlagen wurden

Abbildung 2

Entwicklung der KWK-Nettowärmeerzeugung nach Energieträgern von 2003–2018



Quelle: Eigene Darstellung nach StaBa (2020a), (2020b), ÖkoInstitut, Umweltbundesamt /Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, Stand 11/2019

vor 1990 errichtet, woraus sich technischer Erneuerungsbedarf ergibt. Ein großer Teil der bestehenden industriellen Steinkohle-KWK-Anlagen wird in den nächsten Jahren durch gasbefeuerte KWK-Anlagen ersetzt werden. Der Erneuerungsbedarf, sowohl der industriellen steinkohlebasierten Wärmeproduktion als auch der öffentlichen Versorgung muss vor dem Hintergrund des Kohleausstiegs nun neu bewertet werden. Das Kohleausstiegsgesetz gibt hierfür den Rahmen vor (vgl. auch Kapitel 4).

sung liefert also nicht die erforderliche Genauigkeit, um ein umfassendes Bild der Umweltwirkung der Steinkohle-KWK liefern zu können.

Stellt man die statistisch erfasste Steinkohle-KWK-Wärmeproduktion einer anlagenscharfen Betrachtung gegenüber, so ist zu erkennen, dass ein Drittel der Produktion zur Versorgung von Industrieunternehmen und etwa zwei Drittel in Fernwärmenetze der öffentlichen Versorgung eingespeist werden. Der Industrieanteil ist damit etwa doppelt so hoch, wie in den durch das statistische Bundesamt ermittelten Daten (Prognos et al., 2019). Die statistische Erfas-

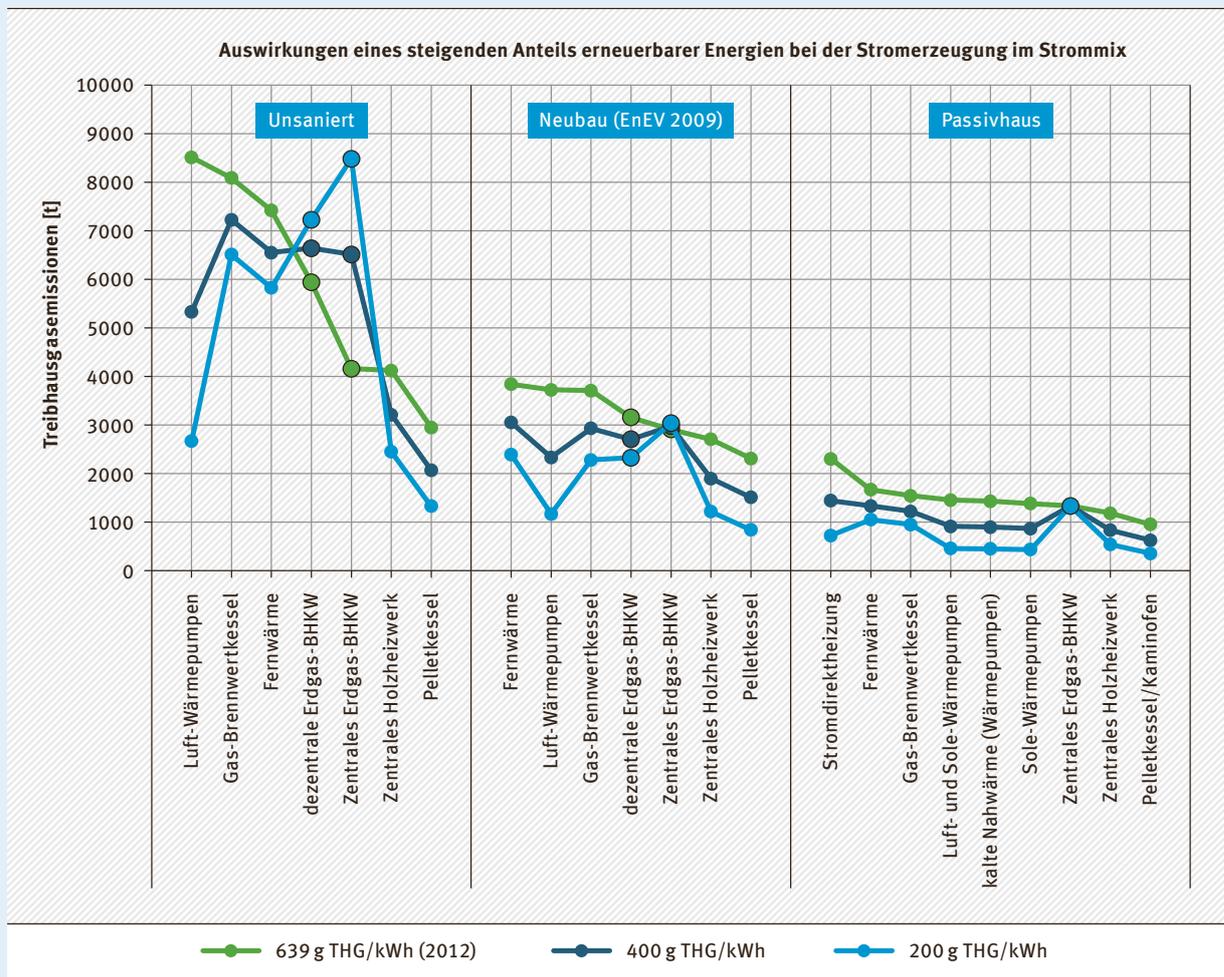
KWK und andere Heiztechniken im Vergleich

Die verursachten Treibhausgasemissionen sind ein wichtiges Kriterium für die Auswahl der Wärmeversorgung von Gebäuden. Im Vergleich mit anderen Heiztechniken ist die Wärmeerzeugung mit KWK für die Versorgung von Gebäuden heute oft klimafreundlicher. Das zeigt sich am Beispiel der Versorgung einer Siedlung mit Wärme und Strom (Abbildung 3): Erdgas-KWK verursacht beim gegenwärtigen Strommix sowohl gegenüber konventionellen Heiztechniken wie Gas-Heizkesseln als auch

gegenüber Elektro-Wärmepumpen niedrigere Treibhausgasemissionen. Die KWK wurde hier mit der Finnischen Methode (s. Kapitel 3.1.1) bilanziert. Darüber hinaus zeigt sich auch, dass der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien entscheidenden Einfluss auf die Treibhausgasbilanz hat: Sinken auf diese Weise die Treibhausgasemissionen des Strommixes, schmilzt der Klima-Vorteil der Erdgas-KWK drastisch und Elektro-Wärmepumpen werden deutlich attraktiver (UBA, 2013b).

Abbildung 3

Treibhausgasemissionen für die Versorgung einer Siedlung mit Strom und Wärme



Bezug von Strommix durch Endverbraucher. Bei dezentralen BHKW anteilige, bei zentralem Nahwärme-BHKW vollständige Netzeinspeisung mit Gutschrift in Höhe des Strommixes.

Quelle: UBA (2013b)

3 Umweltentlastung und andere Umwelteffekte der KWK

3.1 Der Klimaschutzbeitrag der KWK

Als Effizienztechnik trägt die KWK zur Reduzierung der Kohlendioxidemissionen sowie zur Einsparung von Primärenergieträgern bei. Dies ist ein Grund, sich mit der Effizienztechnik KWK klima- und energiepolitisch auseinander zu setzen und sie zu fördern. Gleichzeitig entstehen auch bei der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme aus fossilen Brennstoffen CO₂-Emissionen. Um die CO₂- und Primärenergie-Einsparungen durch die KWK im Vergleich zur ungekoppelten Energieerzeugung zu ermitteln, kommen unterschiedliche Berechnungsmethoden zur Anwendung, die im Folgenden dargestellt werden. Weiter werden die CO₂-Einsparung sowie die Treibhausgas-Emissionen, die durch KWK weiterhin entstehen, in diesem Kapitel adressiert.

3.1.1 Allokationsmethoden zur Zuordnung von CO₂-Emissionen auf die Kuppelprodukte Strom und Wärme

Um eine Aussage zu den jeweiligen strom- bzw. wärmebezogenen CO₂-Emissionen treffen zu können, müssen bei KWK-Anlagen die Emissionen der eingesetzten Brennstoffe den Produktionsanteilen von Wärme und Strom zugerechnet werden. Dabei gibt es verschiedene Methoden dieser sogenannten Allokation. Mit dieser Zuteilung lassen sich Einsparungen, sowohl der Primärenergie, als auch von Kohlendioxid bei konkreten Anlagen ermitteln. Die Allokationsmethoden werden aber auch in der Energiestatistik angewendet.

Bei Gutschrift-Verfahren wird entweder Strom oder Wärme als Hauptprodukt definiert, sowie ein ungekoppelter Referenzprozess mit dem hypothetisch das Produkt alternativ erzeugt würde. Dem jeweiligen Hauptprodukt (bei der „Stromgutschrift“: Strom) wird dann die CO₂-Menge zugeordnet, die in einem Referenzprozess entstehen würde (z. B. mittels Primärenergiefaktor für den Verdrängungsstrommix = 2,8). Die Vergleichsmenge wird von der verursachten CO₂-Menge abgezogen, sodass sich die verbleibende CO₂-Menge für die Wärmeerzeugung ergibt (IFEU et al., 2016). Dieser Rest für das Nebenprodukt (hier Wärme) fällt bei der Stromgutschriftmethode verhältnismäßig gering aus oder sogar den Wert Null (theoretisch auch kleiner Null) annehmen, da es als „Abfall“-Produkt gewertet wird.

Andere Allokationsverfahren ermöglichen eine Aufteilung ohne Erteilung einer Gutschrift. Eine solche Methode ist die Carnot-Methode. Bei der Berechnung des Carnot-Wirkungsgrads wird neben der Quantität auch die Qualität der Energie physikalisch berücksichtigt. Damit bildet die exergetische Betrachtung den Gütegrad der Energieumwandlung ab. Kern der Bewertung ist die theoretische Stromerzeugungs- bzw. Arbeitsfähigkeit (Exergie) der erzeugten Produkte. Über ein thermodynamisches Prozessmodell (benannt nach Carnot) wird, in Abhängigkeit von Vor- und Rücklauftemperatur der Wärmeeinspeisung sowie der Umgebungstemperatur, ein theoretischer Stromverlust ermittelt und die eingesetzte Brennstoffmenge auf die Koppelprodukte Strom und Wärme aufgeteilt. Dies erfolgt unter Beachtung physikalischer Gesetzmäßigkeiten, wobei die Abgrenzung des KWK-Prozesses und eines Referenzsystems nicht notwendig ist (Pehnt und Schneider, 2010).

Bei der Finnischen Methode wird die Aufteilung in Strom und Wärme über den Vergleich mit Referenzwirkungsgraden der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme vorgenommen (IFEU et al., 2018). Die Logik der finnischen Methode liegt darin, dass sie die reduzierte Brennstoffmenge gemäß dem Verhältnis der Wirkungsgrade der ungekoppelten Erzeugung zuordnet. Die Methode kommt in der Energie-Effizienz-Richtlinie (EU, 2012) zur Anwendung, in der auf europäischer Ebene die KWK adressiert wird.

Anwendung der finnischen Methode: Das „Hocheffizienzkriterium“

Eine KWK-Anlage gilt nach der EU Energie-Effizienz-Richtlinie als hocheffizient, wenn die in der KWK-Anlage erzeugten Mengen Strom und Wärme gegenüber der getrennten Erzeugung in einer Referenzanlage eine Primärenergieeinsparung von mindestens 10 % aufweisen. KWK-Klein- und -Kleinanlagen gelten durch jegliche Primärenergieeinsparung als hocheffizient. Dieser Definition folgt auch das KWKG.

3.1.2 CO₂- und Primärenergieeinsparung durch KWK

Erlaubt eine Allokation mit den dargestellten Methoden eine Zuordnung der CO₂-Emissionen auf die jeweiligen Produkte Strom und Wärme, so ist im Fall der KWK weiter von Relevanz, welche Einsparungen an CO₂ oder Primärenergie sich aus der gekoppelten gegenüber einer ungekoppelten Erzeugung ergeben.

Der Verdrängungsstrommix bildet die durch eine zusätzliche KWK-Stromeinspeisung erreichte Veränderungen im Stromerzeugungsmix für Deutschland ab. Über ein stundenscharfes Kraftwerksmodell wird dabei die faktische Verdrängung von Strommengen durch die zusätzliche KWK-Einspeisung auf Anlagenebene ermittelt. Abhängig vom Betrachtungszeitpunkt war dies in der Vergangenheit erster Linie die Erzeugung aus Stein- bzw. Braunkohlekraftwerken im Kondensationsbetrieb. Mit der zugrundeliegenden Berechnungssystematik wird der Einsatzreihenfolge (Merit-Order) der Kraftwerke im deutschen Strommarkt Rechnung getragen. Im Ergebnis spiegeln sich sowohl der Einspeisevorrang der erneuerbaren Energien als auch beispielsweise die geringen Grenzkosten der Kernenergie oder auch der Braunkohlverstromung wider. Durch die erhebliche Reduktion der Stromerzeugung aus Steinkohle in den letzten Jahren, kann dieser Ansatz für die Zukunft nicht weiter fortgeführt werden: Schon in 2019 beträgt die Steinkohlerzeugung nur noch 55 TWh, weniger als die Hälfte der Erzeugung im Jahr 2013. Allein im quantitativen Vergleich mit den Gesamtmengen an KWK-Strom wird deutlich, dass nicht die gesamte KWK-Stromerzeugung die Steinkohle-Erzeugung ersetzen kann. Der durchschnittliche Emissionsfaktor des Referenzsystems für systemdienlich betriebene KWK-Anlagen muss also schon in den aktuellen Jahren zwischen den Emissionsfaktoren von Gas-Kraftwerken und dem Verdrängungsmix liegen. Bei einem erfolgten Kohle-Ausstieg liegt der Verdrängungsmix einer vollständig systemdienlich betriebenen KWK-Anlage bei dem Emissionsfaktor einer Gas-GuD-Anlage, und damit nur etwa halb so hoch wie beim Emissionsfaktor eines Merit-Order-Kraftwerks im Jahr 2017.

Der Emissionsfaktor für den deutschen Strommix wird berechnet aus den direkten CO₂-Emissionen, die bei der gesamten Stromerzeugung entstehen, und dem für den Endverbrauch netto zur Verfügung stehenden Strom aus der Stromerzeugung in Deutsch-

land (UBA, 2019b). Für das Jahr 2017 beträgt er 489 gCO₂/kWh und wird in der Berechnungsmethode des durchschnittlichen Emissionsfaktors angesetzt.

Die CO₂-Einsparungen durch die gesamte KWK gegenüber ungekoppelter Erzeugung beliefen sich im Jahr 2017 auf 17–54 Mio tCO₂, abhängig von der zugrundeliegenden Methodik (Verdrängungsmix/durchschnittlicher Emissionsfaktor). Dabei ist die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme um insgesamt 24 TWh angestiegen. Hiermit verbunden sind zusätzliche Emissionen aus KWK-Erzeugung i. H. v. rund 6 Mio tCO₂ (Prognos et al., 2019). Dieser Anstieg führt zu einem Anstieg der CO₂-Einsparung bei der Berechnung nach dem Verdrängungsmix. Wird der Strommix herangezogen, wirkt sich der sinkende Emissionsfaktor stärker auf das Gesamtergebnis aus (Abbildung 4).

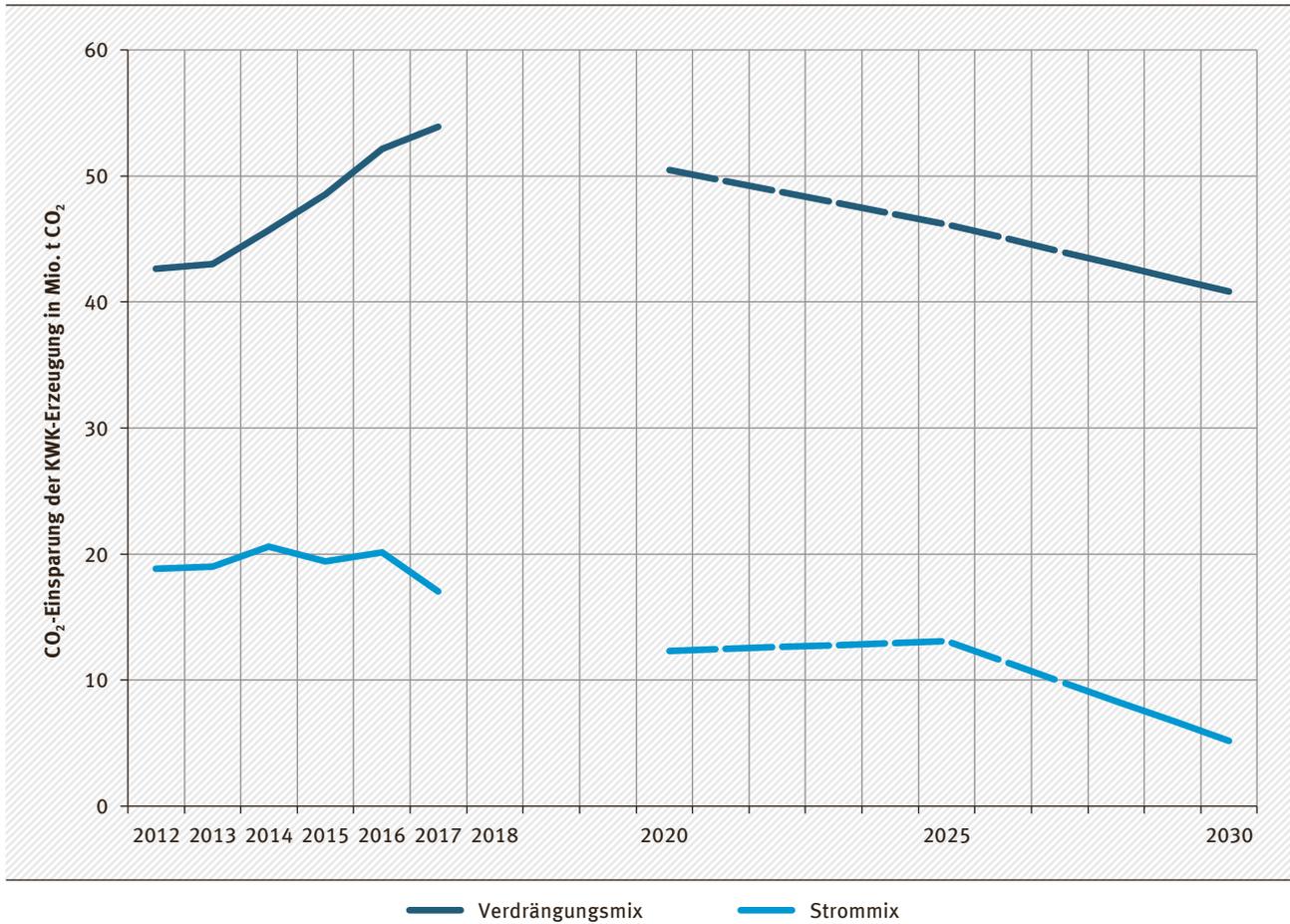
Die Einsparungen ergeben sich aus drei Aspekten. Erstens dadurch, dass die theoretischen Emissionen der ungekoppelten Erzeugung mit den tatsächlichen Emissionen aus KWK-Erzeugung verrechnet werden. Zweitens sinken die Emissionsfaktoren aufgrund der allgemeinen Dekarbonisierung des Energiesystems. Drittens steigen durch den Ersatz von Kohle-KWK durch Gas-KWK die Einsparungen, da die CO₂-Emissionen der KWK-Anlagen sinken.

Obwohl die gekoppelte Erzeugung zu CO₂- und Brennstoffeinsparung führt, entstehen bei der Erzeugung von Strom und Wärme aus fossilen Brennstoffen noch immer Emissionen. Die Höhe der Emissionen ist abhängig von der Effizienz der Stromerzeugungstechnologie, den eingesetzten Brennstoffen und ihren brennstoffspezifischen Emissionsfaktoren. Über den Zeitraum zwischen 2003 und 2018 liegen die CO₂-Emissionen etwa bei 80 Mio. t jährlich (Abbildung 5).

Dabei haben sich die gekoppelt erzeugten Strom- und Wärmemengen sowie die Anteile der dafür verwendeten Brennstoffe über den Zeitraum verändert. Ordnet man den jeweiligen Produkten Strom und Wärme nach der finnischen Methode die eingesetzten Brennstoffe und die damit einhergehenden CO₂-Emissionen zu, ergeben sich für die KWK-Stromerzeugung im Durchschnitt Emissionen in Höhe von 342 gCO₂/kWh. Damit sind die spezifischen Emissionen für die KWK-Stromerzeugung deutlich niedriger als die durchschnittlichen spezifischen Emissionen des deutschen

Abbildung 4

Spanne der CO₂-Einsparung der KWK Erzeugung



Für den hier dargestellten Verdrängungsmix wurden Projektionen von 2017 verwendet, die den mit dem Kohleausstiegsgesetz geplanten Kohleausstieg und einen geplanten EE-Anteil von 65 % in 2030 nicht beinhalten.

Quelle: Eigene Darstellung Prognos et al. (2019) auf Basis von Daten des Ökolnstituts 2020

Strommixes in Höhe von 489 gCO₂/kWh. Für die KWK-Wärmeerzeugung sind es 207 gCO₂/kWh. Die spezifischen Emissionen der KWK-Wärmeerzeugung entsprechen damit etwa der Versorgung mit einer ungekoppelten Erdgas-Feuerung (Brennwertkessel mit 100 % Wirkungsgrad). Betrachtet man die gesamte KWK-Erzeugung, liegen die durchschnittlichen Emissionen bei 252 gCO₂/kWh (Prognos, IFAM et al. 2019). Dies liegt an den besonders hohen Emissionsfaktoren von Stein- und Braunkohle. Trotz des hohen Anteils an emissionsfreien Energieträgern liegen die CO₂-Emissionen damit derzeit in der Größenordnung etwa bei denen von Heizöl.

Im Jahr 2017 wurde eine Primärenergieeinsparung durch KWK-Erzeugung von etwa 12 % des Primärenergieeinsatzes der ungekoppelten Erzeugung erreicht. Die Berechnung dieser Einsparungen basiert auf den Referenzwerten der Energieeffizienz-

richtlinie. Dieser Wert ist jedoch nur sehr begrenzt aussagekräftig, dies hat eine Reihe von Gründen. Zum einen erfolgt die Berechnung des Primärenergiefaktors nur gegenüber einem Referenzsystem mit gleichem Brennstoff, nicht gegenüber den vor Ort zur Verfügung stehenden ungekoppelten (erneuerbaren) Systemen. Dies bedeutet, dass der Primärenergieverbrauch einer Steinkohle-KWK-Anlage mit dem einer ungekoppelten Steinkohle-Erzeugung verglichen wird und nicht mit einer zur Verfügung stehenden Strom- und Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien. Somit wird ein Wechsel zu CO₂-armen Brennstoffen mit der Berechnung nicht grundsätzlich adressiert. Weiter wird durch die Methode die Systemdienlichkeit einer Anlage negativ bewertet, da eine flexible Fahrweise der Anlagen (und damit einhergehenden geringeren Gesamtnutzungsgraden) den errechneten Primärenergieverbrauch erhöht, wodurch geringere Primärenergieeinsparungen

ausgewiesen werden. Zusätzlich ist der Gesamtnutzungsgrad für den gesamten KWK-Anlagenpark extrem schwer zu bestimmen. Schließlich bevorzugen die in der Energieeffizienzrichtlinie angelegten Korrekturfaktoren KWK-Anlagen in Eigenversorgung auf unteren Spannungsebenen – unabhängig davon, wie viel Primärenergie diese Anlagen tatsächlich einsparen (Prognos et al., 2019). All diese Einschränkungen müssen mit Hinblick auf den Aussagegehalt bezüglich der Primärenergieeinsparung vor dem Hintergrund eines sich grundlegend wandelnden Energiesystems mitbetrachtet werden.

3.1.3 Klimaschutzeffekte durch Methanemissionen bei KWK-Anlagen

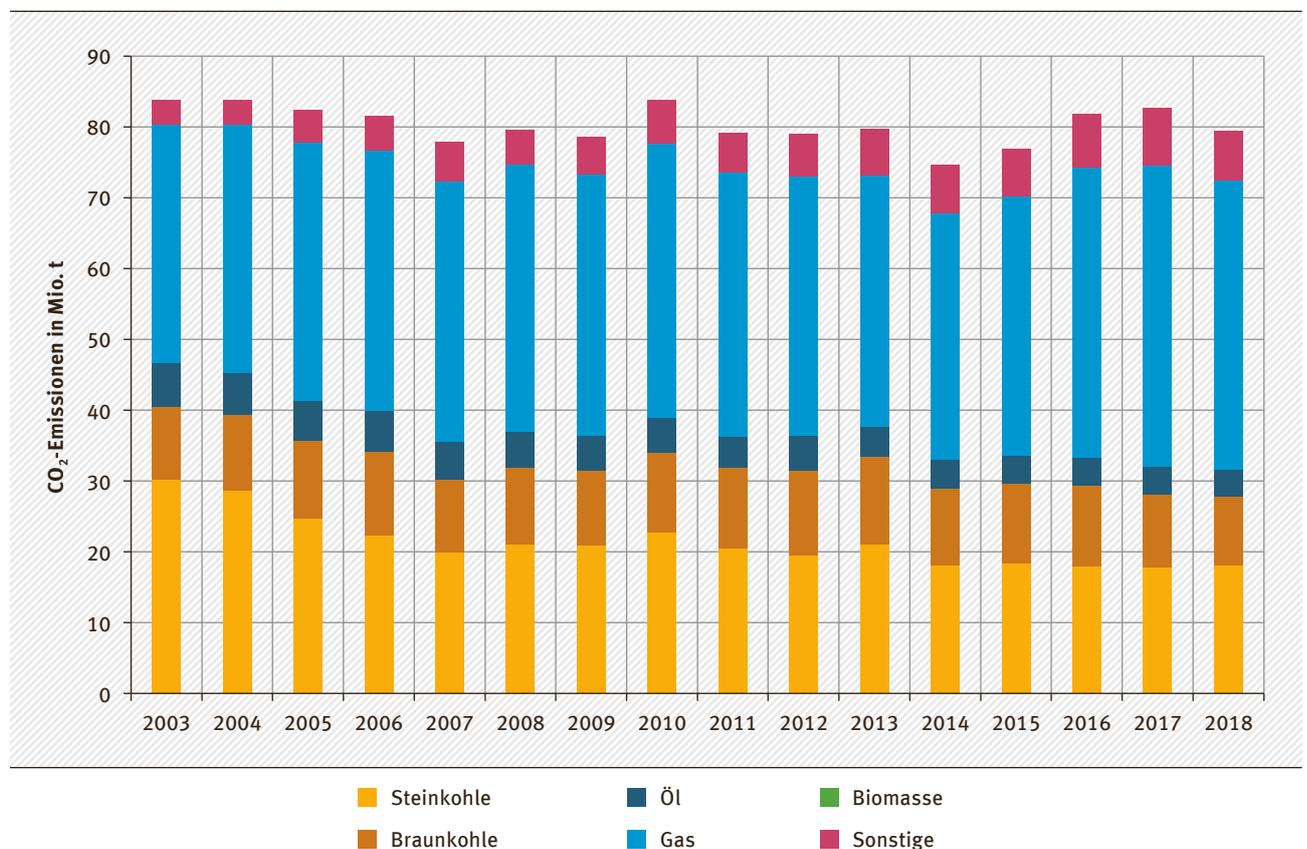
Insbesondere bei der Nutzung von gasförmigen Brennstoffen (darunter Erdgas, Biogas, Biomethan, Deponiegas, Klärgas) in Verbrennungsmotoren (hauptsächlich Magermotoren und Lambda-1-Moto-

ren²⁾ wird der Brennstoff nicht vollständig verbrannt. Ein kleiner Teil des Brennstoffes, der bei Erdgas zu über 90 % und bei Biogas, Klärgas und Deponiegas zu großen Teilen aus Methan besteht, entweicht unverbrannt in die Atmosphäre. Im Vergleich zu Kohlendioxid (CO₂) hat Methan (CH₄) in der Atmosphäre ein 25-fach höheres Treibhausgaspotenzial (UBA, 2018). Der sogenannte Methanschlupf stellt damit ein Problem für alle Verbrennungsmotoranlagen mit methangashaltigen Brennstoffen dar, unabhängig von der Anlagengröße und davon, ob die Anlagen in einem gekoppelten oder ungekoppelten Prozess betrieben werden. Da ein Vorteil der KWK jedoch in der Treibhausgaseinsparung liegt, stellt sich die Frage nach der Treibhausgasbewertung hier in besonderer Weise.

²⁾ Der Unterschied dieser beiden Motorarten liegt im Wesentlichen in dem zum Einsatz kommenden unterschiedlichen Brennstoff-Luft-Gemisch.

Abbildung 5

CO₂-Emissionen des Brennstoffeinsatzes in KWK-Anlagen 2003–2018



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Daten StaBa (2020a), (2020b), Gores and Nissen (2019), ÖkoInstitut (2018)

Wesentliche Quellen für unverbrannte Methan-Emissionen sind bei Gasmotoren der Schlupf während der Ventilüberschneidung, Fehlzündungen, das Verlöschen der Flamme an Wänden und Brennraumspalten (Quenching) sowie die unvollständige Verbrennung insbesondere bei mageren oder inhomogenen Brennstoffgemischen (de Zwart et al., 2012).

Technische Möglichkeiten zur Emissionsminderung

Wichtige Einflussgrößen auf die Methanemissionen im Abgas sind die Überschneidungen der Einlass- und Austrittszeiten der Ventile, die Brennraumgeometrie, das Brennstoff-Luftverhältnis³ und die Brennraumtemperatur. Da die Wahl dieser Parameter aber auch die Energieeffizienz und das Emissionsverhalten anderer Schadstoffe beeinflussen, lässt am ehesten eine verbesserte Brennraumgeometrie ein noch hebbares Verbesserungspotenzial erwarten, ohne die anderen Umweltparameter negativ zu beeinflussen. In erster Näherung ist daher davon auszugehen, dass die alleinige Anwendung von Betriebsmaßnahmen zu keiner deutlichen Methanemissionsminderung führen wird.

Da genau dieses Emissionsniveau aber im Falle der Methanemissionen aus Sicht des Klimaschutzes unangemessen hoch ist, kommt den Verfahren zur Minderung außerhalb des Motors eine hohe Bedeutung zu. Außermotorisch kann für Magermotoren durch Abgasreinigungstechnik mittels Katalysatoren eine Reduzierung der Methanemissionen erreicht werden. Die katalytische Oxidation (oder auch katalytische Nachverbrennung) ist ein Verfahren zur thermischen Abgasreinigung, das bevorzugt zur Minderung von Kohlenwasserstoffemissionen eingesetzt wird. Dabei durchströmt ein mit Schadstoffen beladenes Abgas einen Reaktor, in dem sich der Katalysator befindet. Im Abgas enthaltene gasförmige Kohlenwasserstoffe werden zu Kohlenstoffdioxid und Wasser oxidiert. Eine hohe Oxidationswirkung erfordert insbesondere hohe Abgastemperaturen im Bereich um etwa 550 °C. Bisher ist eine solche Konfiguration der Abgasnachbehandlung nicht etabliert, da wegen eines bisher fehlenden entspre-

chend anspruchsvollen Methangrenzwertes hierzu kein Anreiz besteht. Die technische Entwicklung der Katalysatoren hat noch keine Marktreife erreicht. Zum erreichbaren Minderungspotenzial können daher derzeit keine quantitativen Angaben vorgelegt werden.

Eine Reduzierung auf Werte, wie sie in Kohlekraftwerken gemessen werden (um und unter 10 mg/m³ bei 6 % Sauerstoff (O₂)), könnte derzeit nur mittels einer thermischen Nachverbrennung erreicht werden. Thermische Nachverbrennungsanlagen werden hauptsächlich in Bereichen eingesetzt, bei denen hohe Gehalte organischer Verbindungen in der Abluft vorzufinden sind. Hierbei werden bei Temperaturen zwischen 650 °C und 820 °C die in der Abluft enthaltenen brennbaren Stoffe oxidiert. Die Beständigkeit der thermischen Nachverbrennung gegenüber Katalysatorgiften wie Chlor- und Schwefelverbindungen ist ein Vorteil dieses Abgasreinigungsverfahrens. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass es mit einer flexiblen Fahrweise der KWK-Anlagen, mit teilweise wenigen Stunden pro Tag, wegen der kontinuierlichen Bereitstellung der hohen Temperaturen in der thermischen Nachverbrennungsanlage nicht kompatibel ist. Weiter erfordert diese einen erhöhten Kostenaufwand für die Anschaffung sowie gegebenenfalls die Zugabe von weiterem Brennstoff, um die Betriebstemperaturen der thermischen Nachverbrennung zu erreichen (Böhm et al., 2010). Hinzu kommt, dass der Platzbedarf für die Einrichtungen zur thermischen Nachverbrennung nach derzeitigem Kenntnisstand hoch ist. Gerade im Falle von großen Verbrennungsmotoranlagen mit ihren großen Abgasvolumenströmen dürfte der zusätzliche Platzbedarf, aber auch die mit dem Verfahren verbundenen zusätzlichen Investitionskosten den Einsatz dieses Verfahrens erheblich erschweren. Insgesamt wird daher die Technik der thermischen Nachverbrennung für Verbrennungsmotoranlagen zurzeit nur in Nischenanwendungen, wie z. B. Deponiegasmotoren, angewendet.

Umweltschutzrechtliche Vorschriften

Methanemissionen aus mittelgroßen Verbrennungsmotoranlagen werden in Deutschland durch die Verordnung über mittelgroße Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen (BImSchV, 2019) erstmals immissionsschutzrechtlich begrenzt. Sie unterliegen nicht dem Treibhausgas-Emissionshandel. Der Emissionsgrenzwert der 44. BImSchV

³ Verschiedene Brennstoff-Luft-Gemische sind gekennzeichnet durch das Verbrennungsluftverhältnis λ . Aus dieser Kennzahl lassen sich Rückschlüsse auf den Verbrennungsverlauf, Temperaturen, den Wirkungsgrad und Schadstoffentstehung ziehen. Bei Magermotoren wird der Brennstoff bei Luftüberschuss verbrannt, um einen höheren elektrischen Wirkungsgrad zu (Böhm, 2010). λ -1-Motoren verbrennen den gashaltigen Brennstoff in einem stöchiometrischen Prozess. Entsprechend den unterschiedlichen Motoren kommen unterschiedliche Minderungstechniken zum Einsatz.

44. BImSchV mit CH₄-Grenzwert:

- ▶ 1,3 g/m³ (Gesamtkohlenstoff):
für Erdgasmotoren ab 2025,
für neue Biogasmotoranlagen ab 2023,
für bestehende Biogasmotoranlagen ab 2029
- ▶ für Ottomotoren mit $\lambda = 1$ gelten 0,30 g/m³,
jeweils bezogen auf 5 % O₂

für Mager- und Zündstrahlmotoren in Höhe von 1,3 g Gesamtkohlenstoff je Normkubikmeter Abgas gilt für Erdgasmotoren ab 2025 und ist voraussichtlich durch eine rein motorische Minderung realisierbar. Aufgrund dieser fehlenden Anreize bestehen derzeit auch keine technischen Lösungen, um eine wirksame Emissionsminderung zu erzielen. Mit Hinblick auf etwaige Ausbaubedarfe von Gas-KWK-Anlagen im Zuge der Energiewende müssen für diese Anlagen Lösungen zur Methanminderung in Planung und Anlagenbau entwickelt und durch politische Rahmenbedingungen flankiert werden.

Für Verbrennungsmotoren, die methanhaltige Gase stöchiometrisch verbrennen (Lambda-1-Motoren), steht mit dem 3-Wege-Katalysator eine erprobte, wirksame Abgasnachbehandlungstechnik zur Minderung von Stickstoffoxiden, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen zur Verfügung. Da die Abgastemperatur bei einer stöchiometrischen Verbrennung höher ist als bei Magermotoren, oxidiert der Katalysator auch Methan. Daher setzt die 44. BImSchV für diese Anlagen einen Emissionsgrenzwert in Höhe von 0,30 g/m³.

Für Großfeuerungsanlagen, die in der 13. BImSchV geregelt werden, besteht derzeit keine immissionsschutzrechtliche Begrenzung. Die Verordnung befindet sich derzeit jedoch in Novellierung, der Referentenentwurf sieht einen Grenzwert von 800 mg/m³ Methan bei Einsatz von gasförmigen Brennstoffen vor (BMU 2020).

3.2 Weitere Umwelteffekte der KWK

Die Umwelteffekte der KWK folgen aus der Technik, durch die die jeweilige KWK realisiert wird. Dabei stehen diese Wirkungen nicht unmittelbar mit der gekoppelten Erzeugung in Verbindung sondern folgen aus den eingesetzten Brennstoffen, der

Verbrennungstechnik, den Techniken der Emissionsminderung sowie den Techniken, mit denen die Energiewandlung im Wärme-Kraft-Prozess realisiert wird. Hierbei ist weitgehend unbedeutend, ob die Technik zur ungekoppelten oder gekoppelten Erzeugung von Strom bzw. Strom und Wärme eingesetzt wird. Ungeachtet dessen eignen sich bestimmte KWK-Techniken (etwa Verbrennungsmotoranlagen) besonders für verbrauchernahe Standorte, so dass ihre technisch vom Merkmal „KWK“ eigentlich unabhängigen Emissionen für die Beurteilung ihres Einsatzes in KWK hinsichtlich der Immissionen einer besonderen Betrachtung bedürfen.

Für KWK-Anlagen gelten, wie für andere Anlagen auch, Auflagen, die im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG, 2019) bzw. in den auf dem BImSchG basierenden Rechtsverordnungen oder Verwaltungsvorschriften geregelt sind. Durch Immissionen – z. B. Geräusche und Luftschadstoffe – hervorgerufene schädliche Umwelteinwirkungen und erhebliche Belästigungen müssen daher verhindert werden. Das BImSchG basiert auf dem Verursacherprinzip. Deshalb sind die Anlagenbetreiber für die Umsetzung von Minderungsmaßnahmen der Immissionen verantwortlich. Das BImSchG unterscheidet grundsätzlich zwischen genehmigungsbedürftigen und nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen. Die Genehmigungspflichtigkeit hängt entsprechend 4. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV, 2017) folgendermaßen von der Feuerungswärmeleistung, von dem Brennstoff und von der Art der Feuerungsanlage ab (Tabelle 3):

Tabelle 3

Schwellen der Genehmigungspflichtigkeit von Feuerungsanlagen nach 4. BImSchV und Regelungsbereich innerhalb der BImSchV

Feuerungswärmeleistung	Art der Feuerungsanlage und Brennstoff
≥ 1 MW	Feststoffbrenner-, Verbrennungsmotor- und Gasturbinenanlagen
≥ 10 MW	Bio- und Klärgasbrenneranlagen
≥ 20 MW	Flüssigbrennstoffbrenneranlagen mit Heizöl EL, Erdgasbrenneranlagen
≥ 50 MW	alle Strom- und Wärmeerzeuger

Quelle: Eigene Darstellung

Bei genehmigungsbedürftigen Anlagen dürfen laut BImSchG schädliche Umwelteinwirkungen und erhebliche Belästigungen durch Immissionen nicht hervorgerufen werden. Weiter muss Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen und erhebliche Belästigungen durch Immissionen nach dem Stand der Technik getroffen werden.

Darüber hinaus regelt das Gesetz auch Pflichten für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen (Anlagen unter einem Megawatt Feuerungswärmeleistung). Diese sind so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind. Nach dem Stand der Technik müssen zudem unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden.

3.2.1 Geräuschimmissionen

Anlagen erzeugen in der Regel beträchtliche Geräuschmissionen. Typischerweise treten vor allem tonale tieffrequente Geräusche auf, die häufig direkt mit den konstanten Drehzahlen von Verbrennungsmotoren in den Anlagen (bzw. bei kleinen Anlagen aus der Nähe zu Wohngebäuden) korrespondieren. Die Geräusche können bei ungehinderter Schallausbreitung Immissionen verursachen. Die Beurteilungsgrundlage für die Geräuschimmissionen der Anlagen ist die TA Lärm (2017). Darin sind Immissionsrichtwerte für Baugebiete nach Baunutzungsverordnung (BauNVO, 2017) festgelegt. Genehmigungsbedürftige Anlagen werden bereits im Genehmigungsverfahren hinsichtlich ihrer Umwelteinwirkungen durch Geräusche beurteilt und können nach Errichtung und Inbetriebnahme messtechnisch überprüft werden. Bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen wird in der Regel nicht im Vorfeld der Errichtung auf die Einhaltung der Immissionsrichtwerte der TA Lärm geprüft. Um den Stand der Technik nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen im Vorfeld zu prüfen und anzuwenden, kann der Leitfaden des Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz zur Anwendung der TA Lärm (LAI, 2020) angewandt werden. Untersuchungen zeigen jedoch, dass der Stand der Technik nicht in jedem Fall angewandt wird, um vermeidbare Geräuschimmissionen zu verhindern (Hübelt und Schulze, 2014).

Bei der Minderung von Geräuschimmissionen wird vor allem zwischen aktiven und passiven Maßnahmen unterschieden. Aktiv sind alle Maßnahmen die

an der Geräuschquelle effektiv werden, damit Geräusche vermieden oder gemindert werden. Typischerweise werden bei KWK Schwingungsentkopplung, intelligente Abgasführung, schalltechnische Einhausung entsprechender Baugruppen und Abgasschalldämpfer eingesetzt, um Geräusche bereits an der Quelle zu mindern. Teilweise lassen sich auch Minderungen erzielen, wenn der Betriebsablauf bzw. die Betriebspunkte von Anlagen schalltechnisch optimiert werden. Passiv sind alle Maßnahmen, die Geräusche auf dem Weg der Schallausbreitung, bzw. am Immissionsort mindern. So ist primär immer ein möglichst großer Abstand von der Geräuschquelle zum nächsten maßgeblichen Immissionsort zu wählen. Zudem kann immer in Erwägung gezogen werden, dass eine Anlage komplett schalltechnisch eingehaust wird. Auch Lärmschutzwände, -wälle oder Schall abschirmende Betriebsgebäude können sinnvoll eingesetzt werden, um Geräuschimmissionen zu vermeiden oder zu mindern. Maßnahmen am Immissionsort selbst (z. B. Schallschutzfenster) werden immissionsschutzrechtlich nicht als Minderung von gewerblichen Geräuschquellen angesehen, da Geräuschimmissionen in der im Freien beurteilt werden.

3.2.2 Schadstoffimmissionen

Auch für die durch Feuerungsanlagen in die Luft abgegebenen Schadstoffe (etwa Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid, Ruß, Staub, Formaldehyd und Methan) gelten besondere Auflagen, die je nach Genehmigungsbedürftigkeit und Anlagengröße in verschiedenen BImSch-Verordnungen geregelt sind. Auch die europäische Richtlinie über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe (NEC-Richtlinie) erfordert Minderungsvorgaben insb. der Stickstoffdioxide und für Feinstaub (PM_{2,5}).

Wie in Kapitel 2 dargestellt, wurden in den vergangenen Jahren überwiegend Verbrennungsmotoren durch das KWKG gefördert bzw. zugelassen, bei der überwiegenden Mehrheit der Geräte handelt es sich um Blockheizkraftwerke (BHKW). Dabei liegen die Emissionen von Stickstoffoxiden (NO_x) aus Verbrennungsmotoranlagen ohne Emissionsminderung um ein Vielfaches höher als bei anderen Feuerungsanlagen wie etwa Kesseln. Die Mehrheit der gasbasierten Verbrennungsmotoranlagen sind Magermotoren. Bei der mageren Verbrennung entsteht in bedeutendem Ausmaß Formaldehyd aber auch Kohlenmonoxid, welches durch Oxidationskatalysatoren gemindert

werden kann. Magermotoren können zur Minderung von NO_x auch mit Selektiver Katalytischer Reduktion (SCR) ausgestattet werden. In Deutschland ist diese Technik noch nicht üblich, wird jedoch gemäß 44. BImSchV je nach Anlagenart zwischen 2023 und 2029 verpflichtend eingeführt werden. Der in der Zwischenzeit noch geltende Grenzwert für NO_x lässt sich durch Einstellung des Motors erreichen. Ein Emissionsgrenzwert, dessen Einhaltung eine Abgasreinigung für NO_x erfordert, ist in Deutschland für Erdgas-Magermotoranlagen erst ab 2025 vorgeschrieben. Teilweise kommen auch Lambda-1-Motoren mit Drei-Wege-Katalysator zum Einsatz. Diese Technik ist von Kraftfahrzeugen bekannt und gewährleistet sehr niedrige Emissionen von Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffen und Stickstoffoxiden. Die Formaldehyd-Emissionen liegen bei diesen Motoren deutlich unter den Emissionskonzentrationen von Magermotoren.

Für nichtgenehmigungsbedürftige Anlagen bestehen keine bundesweit gültigen Emissionsgrenzwerte in einer Bundesimmissionsschutzverordnung. Dies bedeutet auch, dass Emissionen an diesen Anlagen nicht regelmäßig behördlich überprüft werden. Für die Emissionen von Klein-BHKW mit einer elektrischen Leistung bis zu 50 kW setzt die EU-Verordnung unter der europäischen Ökodesign-Richtlinie (EU, 2013) folgende Emissionsgrenzwerte fest (Tabelle 4):

Tabelle 4

NO_x -Anforderungen für Klein-BHKW bis 50 kW_{el} nach Ökodesign-Richtlinie

Äußere Verbrennung (= Stirling)	
Gas	70 mg NO_x /kWh (Brennwert)
Öl	120 mg NO_x /kWh (Brennwert)
Innere Verbrennung (= Verbrennungsmotor):	
Gas	240 mg NO_x /kWh (Brennwert)
Öl	420 mg NO_x /kWh (Brennwert)

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf EU (2013)

Die Einhaltung dieser Emissionsgrenzwerte wird einmalig in Form einer Messung auf dem Prüfstand nachgewiesen. Die EU-Verordnung verpflichtet nicht zu regelmäßigen Messungen im Betrieb der BHKW. Ohne regelmäßige Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Katalysatoren, z. B. im Rahmen

eines Vollwartungsvertrags, können die Emissionen dieser kleinen Anlagen in der Realität deutlich höher ausfallen.

In einer Untersuchung für das Umweltbundesamt wurden die Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Mini-BHKW auf die Luftqualität in Ballungsräumen untersucht (IVU Umwelt und solaresbauen, 2019). Unter Berücksichtigung der in der Studie getroffenen Annahmen kommt diese zu dem Ergebnis, dass BHKW-bedingte Änderungen der Emissionen und Immissionen auf nationaler Ebene durch die Ersetzung von alten Öl- oder Gasfeuerungen durch Mini-BHKWs als vernachlässigbar klein bewertet können. Lediglich bei einem hohen Substitutionsgrad kann auf lokaler Ebene für Stickstoffdioxid (NO_2) eine Überschreitung der Immissionsgrenzwerte festgestellt werden. Dieses Szenario wird unter der gegenwärtigen wirtschaftlichen Entwicklung jedoch als unwahrscheinlich eingeschätzt.

3.2.3 Biomassepotenzial

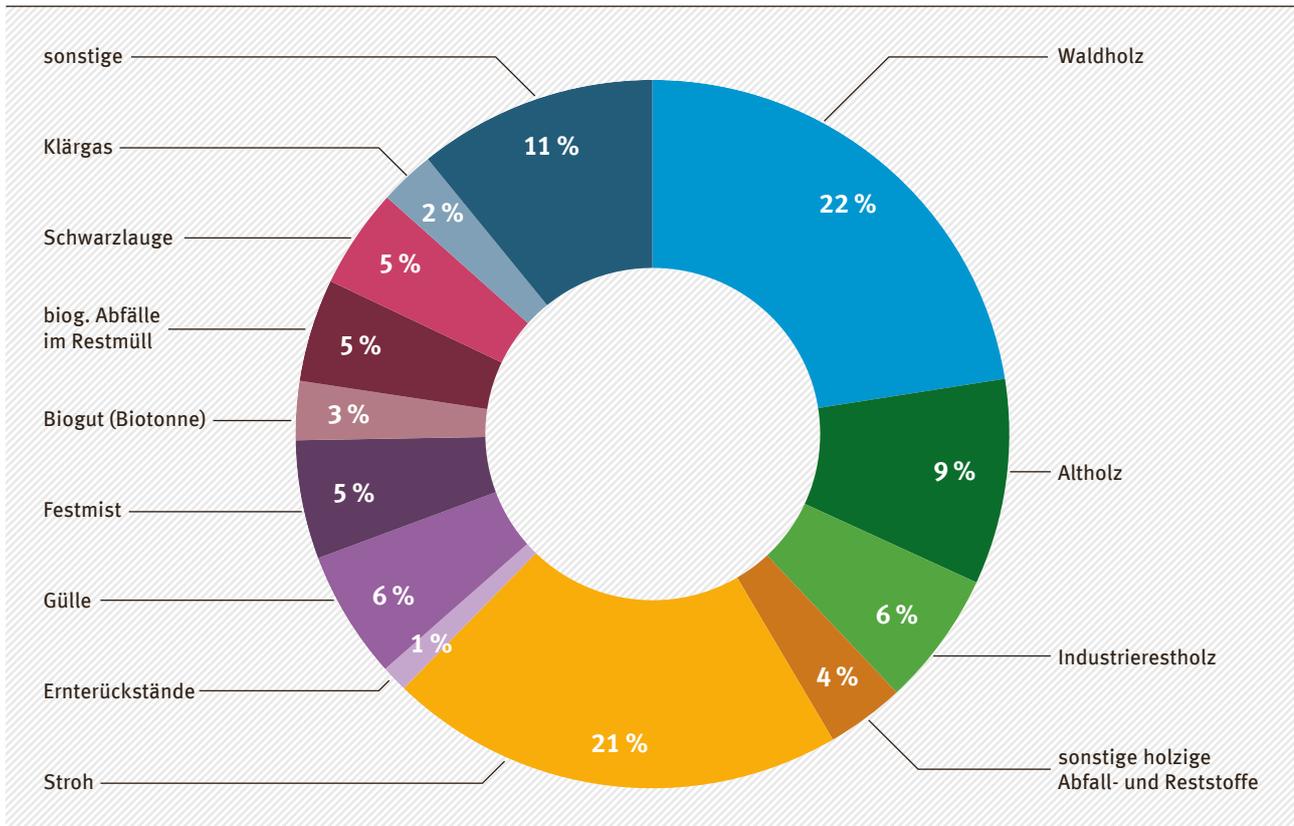
In KWK-Anlagen kommen, wie in Kapitel 2.3.1 dargestellt, hauptsächlich gasförmige (v. a. Biogas und Biomethan) und feste Biomasse (Holzpellets, Altholz, etc) zum Einsatz. Da die land- und forstwirtschaftliche Nutzfläche begrenzt ist, eine Intensivierung der Biomasseproduktion Risiken für Natur und Umwelt birgt und der Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie der stofflichen Nutzung Vorrang einzuräumen ist, sollten für die energetische Nutzung nur biogene Abfall- und Reststoffe in Betracht gezogen werden (UBA, 2013a). So sollte Biomasse zunächst durch Kaskadennutzung mehrfach und effizient genutzt werden, bevor sie der energetischen Nutzung zugeführt wird (nova-Institut et al., 2014).

Im Vorhaben „Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (BioRest)“ für das Umweltbundesamt (IFEU et al., 2019) wurde im Rahmen einer Literaturstudie ermittelt, dass aus Umweltsicht maximal rund 900 PJ an biogenen Abfall- und Reststoffen für die energetische Nutzung zur Verfügung stehen (Abbildung 6)⁴.

⁴ Für die Anwendung in KWK-Anlagen ist der direkte Einsatz als Festbrennstoff (v. a. für die holzigen Stoffe wie Waldholz, Industriestroh, Altholz, sonstige holzige Abfall- und Reststoffe, in MVAs biogene Abfälle im Restmüll, ggf. auch Stroh), in speziellen Anwendungen (wie der Schwarzlaug- und Klärgasnutzung) oder über ein aufbereitetes Produkt (z. B. Biogas aus Gülle, Festmist, Biogut, Stroh oder Ernterückständen) möglich.

Abbildung 6

Energetische Potenziale der Abfall- und Reststoffe, die dem Energiesystem insgesamt in 2020 zur Verfügung stehen (in Prozent, bezogen auf 900 PJ Primärenergie)



Quelle: Eigene Abbildung auf Basis von IFEU, IZES und ÖkoInstitut (2019)

Teile des erschließbaren Potenzials werden bereits energetisch genutzt. Vor allem der Abgleich der in BioRest ermittelten Energieholzpotenziale (für 2020 ca. 360 PJ heizwertbezogen, darunter v. a. Waldholz, Industrierestholz und Altholz) mit der aktuell energetisch genutzten Holzmenge (laut Fortschrittsbericht erneuerbare Energien rund 370 PJ (BR, 2019)) zeigt, dass das energetische Potenzial bereits weitgehend ausgeschöpft wird. Nur bestimmte Stoffströme sind noch in größerem Umfang zusätzlich erschließbar (v. a. Stroh, Gülle/Festmist, Biogut). Strategien zur Abfallvermeidung oder eine zukünftig stärkere stoffliche Nutzung können das erschließbare Potenzial zudem weiter verringern.

Die Höhe des energetischen Biomassepotenzials steht fortwährend in der Diskussion. Aufbauend auf unterschiedlichen Potenzialanalysen und Festlegungen zur akzeptierten Landnutzung und zu möglichen Importen wurde in der Vergangenheit eine große Bandbreite an Potenzialen angegeben und auch aktuell bleiben Potenzialangaben mit enormen

Unsicherheiten verbunden. Im Nationalen Energie- und Klimaplan (BMWi, 2020) wird für das derzeitige maximal verfügbare Biomassepotenzial eine Spanne von 1.000 bis 1.200 PJ für Deutschland angegeben. Hierin ist das Potenzial an Anbaubiomasse enthalten.

Um das begrenzte Biomassepotenzial konkurrieren diverse energetische Anwendungen und nur ein Teil wird in KWK-Anlagen zum Einsatz kommen. Im Projekt BioRest wurden bei der Entwicklung eines „Gesamtnutzungskonzepts“ (dabei wurden keine Energiesystemmodelle genutzt) neben der Energieeffizienz auch Aspekte wie die Substituierbarkeit durch andere erneuerbare Energien berücksichtigt. Die demnach aus Umweltsicht optimale Anwendung ist für die meisten biogenen Abfall- und Reststoffe die Prozesswärmebereitstellung oder Kraftstoffproduktion. Die gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion wird weniger favorisiert. Entsprechend kann der Einsatz von Biomasse nur in Einzelfällen in KWK sinnvoll sein.

4 Der politische Rahmen und die Förderung der KWK

Die KWK ist ein Baustein zur Umsetzung der Energiewende. Dabei werden mit der Energiewende die Ziele wie die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch, der Treibhausgas-Reduktion und die Reduktion des Primärenergieverbrauchs verfolgt (BMWi, 2019). Diese werden mit einer Reihe unterschiedlicher staatlicher Vorgaben adressiert und durch weitere Instrumente unterstützt. Dabei erfolgt die Regulierung und Förderung der KWK in einer Vielzahl von Gesetzen, Verordnungen, sowie Richtlinien auf nationaler und europäischer Ebene. Im Folgenden werden die wichtigsten Regelwerke vorgestellt, allen voran das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz.

4.1 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz

Das „Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung“ (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)) wurde erstmals 2002 verabschiedet. Es trat zum 1. April 2002 in Kraft und gilt aktuell bis 2025. Ziel des aktuellen KWKGs (2020) ist der Ausbau der KWK-Nettostromerzeugung auf mindestens 120 TWh im Jahr 2025 (s. Kapitel 2). Um das Ausbauziel bis 2025 zu erreichen, werden die unterschiedlichen Anlagenklassen durch die Zahlung von Zuschlägen für den Neubau, die Modernisierung und die Nachrüstung von Bestandsanlagen gefördert. Mit den Novellierungen in 2009 und 2012 erfolgten die Anpassung von Vergütungssätzen, Änderungen allgemeiner Vorschriften und die Aufnahme der Förderung von Wärme- und Kältespeichern sowie von Kältenetzen. Mit der Novelle in 2016 trat eine Neufassung des KWKG in Kraft. Beihilferechtliche Bedenken der EU-Kommission machten jedoch eine Überarbeitung und Ergänzung des KWKG 2016 notwendig, die im entsprechend modifizierten KWKG 2017 mündeten. Als wesentliche Neuerungen enthält das KWKG seit 2017 für neue und modernisierte KWK-Anlagen zwischen 1 MW und 50 MW elektrischer Leistung eine Förderung durch Ausschreibung von Zuschlagszahlungen für KWK-Strom sowie die Ausschreibung der Förderung innovativer KWK-Systeme mit hohen Wärmeanteilen aus erneuerbaren Energien (vgl. Kapitel 4.1.3). Mit der Novelle 2020 wurde die Förderdauer unabhängig von der Leistung der KWK-Anlage

vereinheitlicht und diesbezügliche Fördersätze angepasst, die Förderung von Wärme- und Kältenetzen angepasst und neue Boni eingeführt⁵.

Das KWKG wird über eine Umlage finanziert, die auf den Strompreis für die Endverbraucher aufgeschlagen wird. Aktuell beträgt die Umlage 0,226 ct/kWh auf die nichtprivilegierten Letztverbräuche. Unter Betrachtung der Wettbewerbsfähigkeit stromkostenintensiver Wirtschaftsbetriebe sind diese ebenfalls in die Finanzierung der Umlage einbezogen. Sie erfahren jedoch Ausgleichsregeln, ähnlich wie bei der Befreiung von der EEG-Umlage (s. Kapitel 4.2.1). Wird ein Unternehmen durch die Besonderen Ausgleichsregelung im EEG 2017 entlastet, erfährt es auch nach dem KWKG eine Entlastung. Die Umlage ist auf einen maximalen Betrag gedeckelt. Das maximale Fördervolumen der KWKG-Umlage beträgt 1,8 Milliarden Euro pro Jahr.

Durch das BAFA wurden in den Jahren seit seinem Inkrafttreten 15.846 Anlagen gemäß KWKG zugelassen (Stichtag 09.04.2020). In Abbildung 7 sind die Zulassungszahlen seit 2009 dargestellt.

4.1.1 Überblick über die Förderung von Anlagen, Wärmenetzen und -speichern

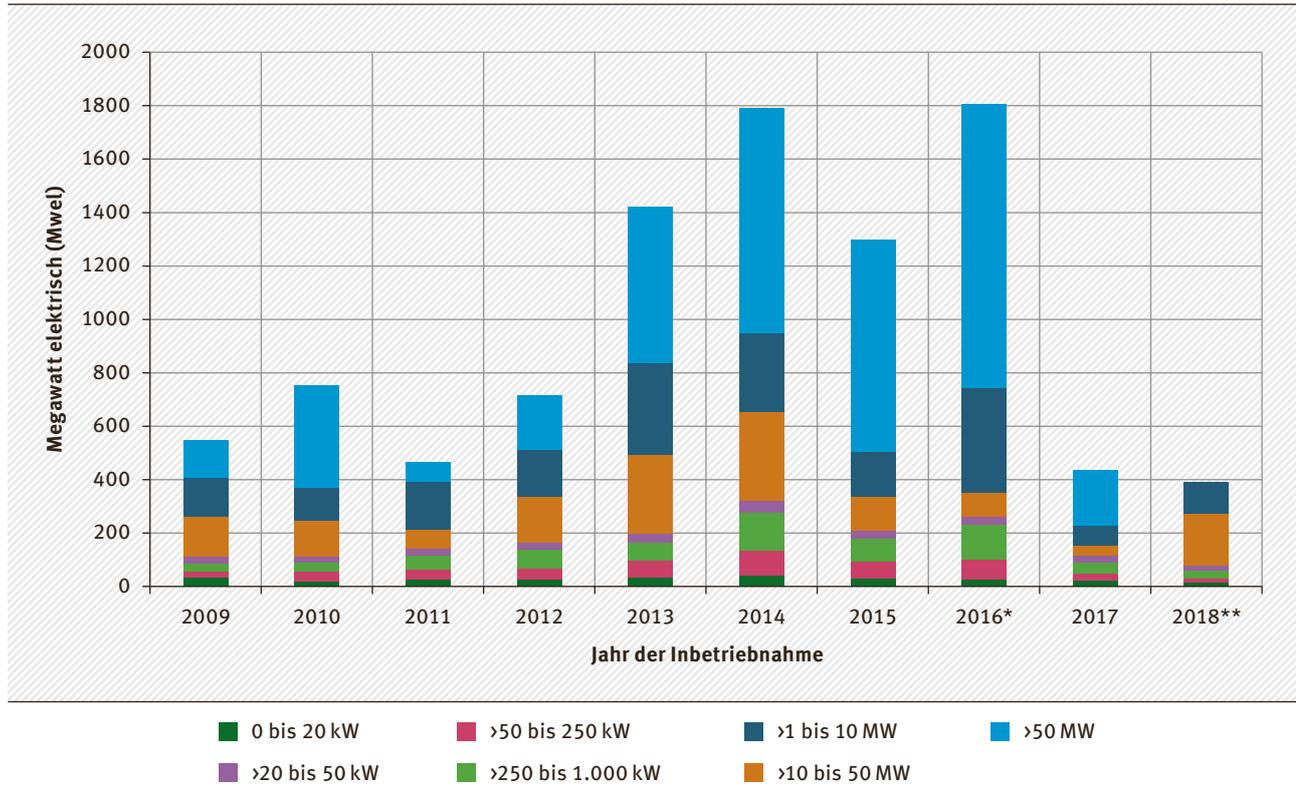
Die unterschiedlichen Anlagenklassen werden im KWKG mit Hinblick auf ihren Einsatzzweck gefördert (KWKG, 2020 (§7)). Die Vergütungssätze sind in Tabelle 5 dargestellt.

Mit der Novellierung 2020 wurde die Dauer der Zuschlagszahlung für neue KWK-Anlagen unabhängig von der Anlagenleistung auf 30.000 Vollbenutzungsstunden einheitlich festgelegt. Dabei wurde eine Übergangsregelung geschaffen, die ein schrittweises Abschmelzen der jährlich zuschlagsberechtigten Vollbenutzungsstunden vorsieht. Die maximale jährliche Förderzuschlag wird ab dem Jahr 2021 für bis zu 5.000 Vollbenutzungsstunden, ab dem Jahr 2023 für bis zu 4.000 Vollbenutzungsstunden und ab dem Jahr 2025 für bis zu 3.500 Vollbenutzungsstunden pro Kalenderjahr gewährt. Gleichzeitig wurden

⁵ Alle Änderungen am KWKG stehen unter beihilferechtlichem Vorbehalt und sind erst anwendbar, wenn die beihilferechtliche Genehmigung durch die Europäische Kommission vorliegt.

Abbildung 7

Anzahl der beim BAFA zugelassenen neuen, modernisierten und nachgerüsteten KWK-Anlagen nach elektrischer Leistung und Inbetriebnahmejahr



* Aufgrund der geänderten Fördersystematik im KWKG 2016 werden Betreibern von KWK-Anlagen über 100 kW keine KWK-Zuschläge für die Eigenversorgung mehr gewährt. Daher werden viele KWK-Anlagen nicht mehr beim BAFA zugelassen, da keine Förderung möglich ist. Außerdem kam es aufgrund der Abkehr von der Förderung mit festen Vergütungssätzen zu Ausschreibungen zu einer temporären Verschiebung von KWK-Projekten.

** Erst 12–24 Monate nach dem Jahresabschluss liegen dem BAFA verlässliche Meldeanzahl vor. Entsprechend bilden die dargestellten Daten kein vollständiges Bild ab.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von BAFA (2020c), Stand 09.04.2020

Tabelle 5

Zuschläge nach dem KWKG (2020)

Elektrische Leistung	Einspeisung in öffentliches Netz	Stromkostenintensive Industrie	Energiedienstleister	Eigenversorgung
Zuschlag in Cent/kWh (leistungsanteilig)				
≤ 50 kW (Anlagen nach KWKG § 7 Abs. 3a)*	16,00	8,00	8,00	8,00
≤ 50 kW	8,00	5,41	4,00	4
> 50 bis 100 kW	6,00	4,00	3,00	3,00
> 100 bis 250 kW	5,00	4,00	2,00	–
> 250 kW bis 1 MW	4,40	2,40	1,50	–
< 1 MW bis 2 MW	Ausschreibung	2,40	1,50	–
> 2 MW bis 50 MW		1,80	1,00	–
> 50 MW	3,10 (3,60 ab 2023)	1,80	1,00	–
wenn Anlage im TEhG	0,3**	0,3	0,3	0,3

*Die Regelung für Mini-KWK nach KWKG § 7 Abs. 3a sieht für Anlagen bis 50 kW eine Begrenzung auf 30.000 Vollbenutzungsstunden vor. Die Gesamtfördersumme bleibt durch die Verdopplung der Fördersätze unverändert.
** Gilt nicht für Ausschreibungsanlagen.

Quelle: Eigene Darstellung nach KWKG (2020)

die Zuschläge für Anlagen < 50 kW verdoppelt, sodass die Förderung für diese Anlagen im Ergebnis gleich bleibt.

Neben der Grundvergütung erhalten Anlagen über 1 MW Zuschlagszahlungen, die auf die Umstellung von Kohle auf Gas, erneuerbare Wärme und elektrische Wärmeerzeugung oder den systemdienlichen Betrieb (Flexibilität und Netzdienlichkeit) der Anlagen abzielen. Mit der aktuellen Novelle wurde der Kohleersatzbonus von einer arbeitsbezogenen Förderung auf eine Einmalzahlung je Kilowatt elektrische KWK-Leistung für Anlagen umgestellt. Er wird für Anlagen gewährt, die Stromerzeugung auf Basis von Stein- oder Braunkohle ersetzen. Dabei muss die KWK-Anlage in das gleiche Wärmenetz einspeisen, in das die zu ersetzende Kohle-KWK-Anlage ihre Wärme abgegeben hat. Die Höhe des Kohleersatzbonus ist nach Alterskohorten der bestehenden KWK-Anlage und der Inbetriebnahme der neuen KWK-Anlage gestaffelt und bewegt sich zwischen 5 und 240 Euro je Kilowatt elektrischer KWK-Leistung.

Ein Bonus für innovative erneuerbare Wärme wird in Abhängigkeit vom Anteil innovativer erneuerbarer Wärme zwischen 0,4 ct/kWh KWK-Strom bei 5 % innovativer erneuerbarer Wärme bis hin zu 7 ct/kWh bei einem 50 %-igen Anteil an der Referenzwärme des innovativen KWK-Systems gewährt.

Die Flexibilität von KWK-Anlagen im Energiesystem kann deutlich gesteigert werden, wenn sie mit elektrischer Wärmeerzeugung kombiniert werden. So können in Zeiten, in denen durch dargebotsabhängige erneuerbare Energien wie Wind und Photovoltaik besonders viel Strom zur Verfügung steht, KWK-Anlagen heruntergefahren werden. Die benötigte Wärmeleistung kann durch die Kombination der Anlagen weiterhin bereitgestellt werden – und dies passend zu den verfügbaren Strommengen über elektrische Erzeugung. Ein Bonus für elektrische Wärmeerzeuger (Power-to-Heat) wird gezahlt, wenn eine KWK-Anlage in der Lage ist, die Wärmeleistung der KWK-Anlage zu mindestens 80 % mit einem fabrikneuen elektrischen Wärmeerzeuger bereit zu stellen. Der Einsatz von Strom in der Wärme-Produktion soll netzentlastend wirken. Daher ist der Betreiber dazu verpflichtet, die KWK-Anlage auf Anforderung des Übertragungsnetzbetreibers in der Wirkleistung zu reduzieren und elektrische Energie für die Aufrechterhaltung der Wärmeerzeugung zu

beziehen. In diesen Fällen wird ein Bonus in Höhe von 70 Euro je Kilowatt thermischer KWK-Leistung des elektrischen Wärmeerzeugers gewährt.

Power-to-Heat

Power-to-Heat-Techniken (PtH) erzeugen Wärme unter Einsatz von elektrischer Energie. Bei der Erzeugung kommen Widerstands-Heißwasserkessel und/oder Elektroden-Heißwasserkessel zur Anwendung. Die erzeugte Wärme kann direkt verbraucht, in ein Fernwärmenetz eingespeist, für die Versorgung von Heizungsanlagen, zur Warmwasserbereitung verwendet oder für die spätere Nutzung in Heißwasserspeichern vorgehalten werden. Ebenso ist die indirekte Erzeugung von Wärme durch den Einsatz von Wärmepumpen möglich (IKEM, 2018), die um ein Vielfaches effizienter arbeiten als Elektro-Heißwasserkessel. PtH-Techniken sind eine Möglichkeit, elektrische Überschüsse aus erneuerbaren Energien für die Wärmebereitstellung zu verwenden, wodurch im Wärmesektor fossile Energieträger und Emissionen eingespart werden können.

Die Marktdurchdringung von PtH-Techniken steht in Deutschland am Anfang, da ein wirtschaftlicher Betrieb unter den aktuellen Rahmenbedingungen i. d. R. nicht gegeben ist. Für PtH-Anlagen, die für die Wärmeversorgung in Wärmenetzen eingesetzt werden, liegen keine statistischen Daten vor. Der ermittelte Gesamtbestand an PtH-Anlagen in Deutschland, die für die Wärmeversorgung in Wärmenetzen eingesetzt werden, lag 2018 in der Größenordnung von 640 MW. Rund zwei Drittel sind in Fernwärmenetze eingebunden. Zwischen 2012 und 2017 wurden 34 Anlagen errichtet, sie weisen eine Gesamtleistung von 439 MW_{el} auf, was einer durchschnittlichen Anlagenleistung von 13,8 MW entspricht. Mit den in Planung/im Bau befindlichen Projekten würde eine Größenordnung von rund 760 MW erreicht (Prognos et al., 2019). Hauptinvestoren für PtH sind wärmenetzbetreibende Stadtwerke. Etwa ein Viertel der Anlagen entfällt auf die Industrie.

Mit dem sogenannten Südbonus sollen Netzengpässe im Frankfurter Raum und südlich der Landesgrenzen Thüringens und Bayerns vermieden werden. Hierfür wird eine Einmalzahlung in Höhe von 60 Euro je Kilowatt elektrischer KWK-Leistung für Anlagen gewährt, die nahezu ausschließlich den in der KWK-Anlage erzeugten KWK-Strom in das Netz der allgemeinen Versorgung einspeisen und zudem in der Lage sind, auch in Zeiten ohne Nutzwärmenachfrage in voller Höhe Strom zu produzieren.

Wärmenetze

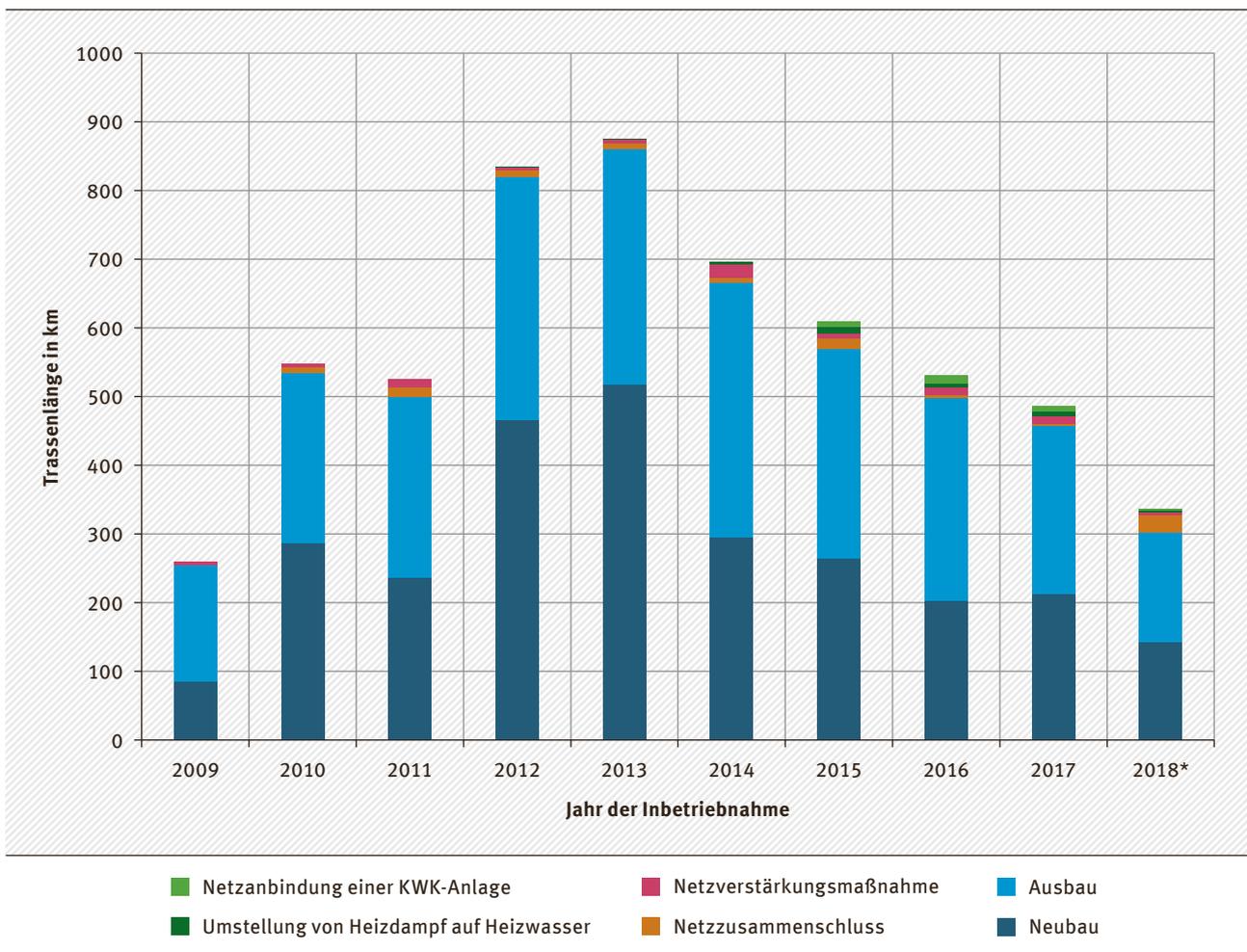
Wärmenetze werden im Rahmen des KWKG ebenfalls gefördert. Sie sind eine Möglichkeit für eine CO2-arme und auf erneuerbaren Energien basierende Wärmeversorgung, die insbesondere in verdichteten Siedlungsbereichen eine effizientere Versorgung gegenüber vielen dezentralen Techniken ermöglicht. Dabei ist ein bestimmter KWK-Anteil in der Erzeugung oder

eine Kombination aus Wärme aus KWK-Anlagen, Wärme aus erneuerbaren Energien oder industrieller Abwärme Voraussetzung für eine Förderung (KWKG, 2020 (§ 18 – § 20)).

Abbildung 8 stellt die Anzahl der geförderten Netze sowie die Trassenlänge nach geförderten Baumaßnahmen von Wärmenetzen dar. Die Anzahl geförderter Trassenkilometer ist zwischen 2009 und 2013 angestiegen, seitdem ist sie jedoch rückläufig, was vor allem im rückläufigen Netzneubau begründet liegt. Die mittlere Länge der gebauten Leitungen je gefördertem Netz ist mit einer Spannweite von 600–970 m weitgehend gleichgeblieben (Prognos et al., 2019). Die starke Zunahme in den Jahren 2012/13 liegt vor allem im Neubau begründet, hier haben sich die gebauten Kilometer fast verdoppelt.

Abbildung 8

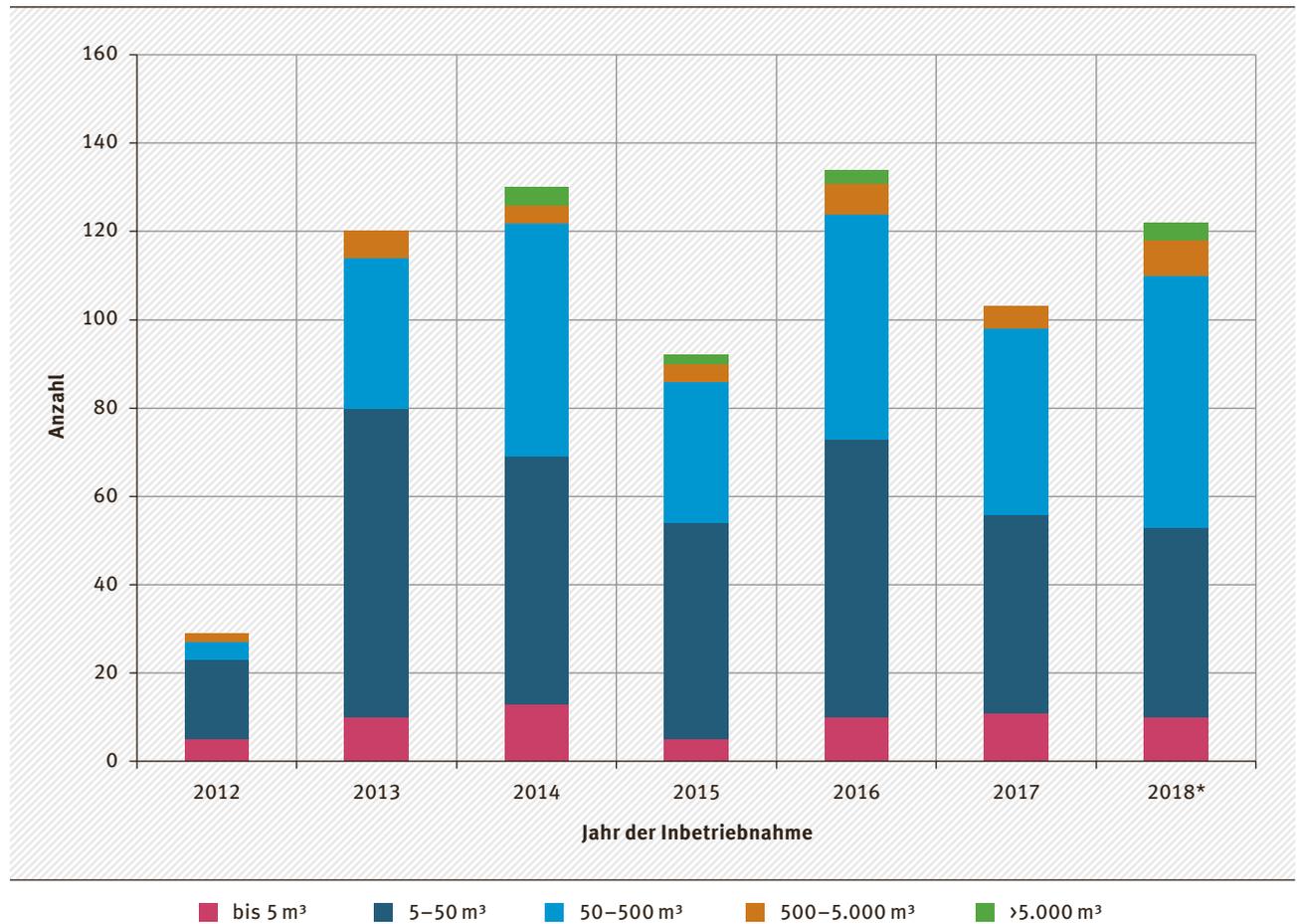
Zulassung von Wärme- und Kältenetze nach dem KWKG. Zulassung je Inbetriebnahmejahr



* Erst 12–24 Monate nach dem Jahresabschluss liegen dem BAFA verlässliche Meldeanzahl vor. Entsprechend bilden die dargestellten Daten kein vollständiges Bild ab.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von BAFA (2020b), Stand 09.04.2020

Abbildung 9

Anzahl der Wärmespeicher nach Größenklassen und Jahr der Inbetriebnahme

* Erst 12–24 Monate nach dem Jahresabschluss liegen dem BAFA verlässliche Meldeanzahl vor. Entsprechend bilden die dargestellten Daten kein vollständiges Bild ab.

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von BAFA (2020a), Stand 09.04.2020

Der große Sprung ab 2012 ist wahrscheinlich auf verbesserte Förderkonditionen im KWKG 2012 zurückzuführen.

Neben dem Neu- und Ausbau gewinnen ab dem Jahr 2015 der Netzzusammenschluss, Netzverstärkungsmaßnahmen, die Netzanbindung einer KWK-Anlage sowie die Umstellung von Heißdampf auf Heizwasser an Bedeutung. Insbesondere letzterer Maßnahme wird zukünftig größere Bedeutung zugemessen, erlaubt sie doch eine Effizienzsteigerung und die Absenkung der Netztemperaturen, die Voraussetzung für die Einbindung erneuerbarer Wärme ist.

Dem Wärmenetzausbau kommt in der Strategie der Wärmenetzbetreiber eine zunehmende Rolle zu, da er ihnen erlauben soll, den Rückgang der Abnahmehemengen durch die Gebäudesanierung durch die Neukundengewinnung zu kompensieren, um so ihr Wärmenetz wirtschaftlich betreiben zu können.

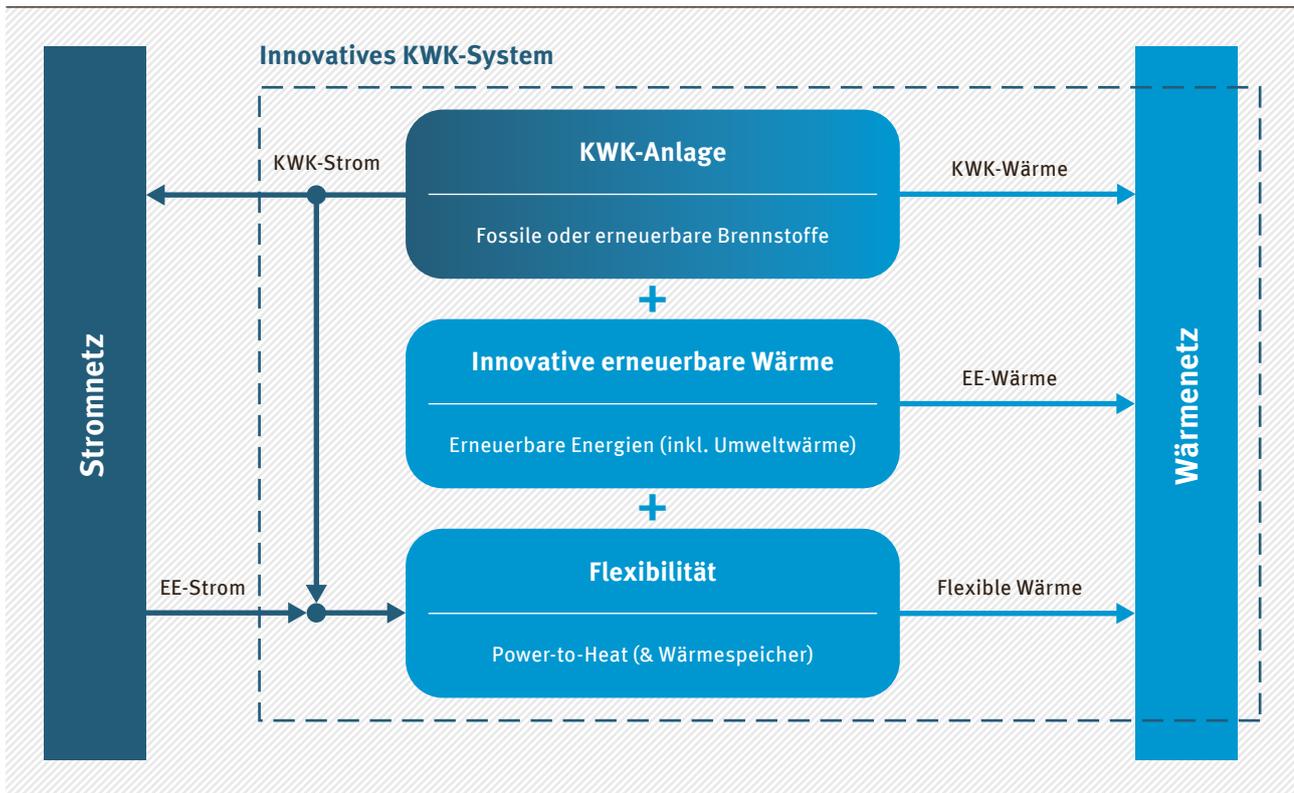
Wärmespeicher

Die Errichtung von Wärmespeichern wird ebenfalls durch das KWKG gefördert (KWKG, 2020 (§ 22 – § 24)). Bei einer stromgeführten Fahrweise der KWK-Anlage, bei der die Wärmeerzeugung unabhängig vom Bedarf erfolgt oder Wärme aus volatilen erneuerbaren Energien erzeugt wird, gewinnen (großvolumige) Speicher an Bedeutung.

Wie Abbildung 9 verdeutlicht, erfuhr der Neubau von Wärmespeichern, die eine Förderung durch das KWKG erhielten, einen starken Zuwachs in den Jahren 2012 und 2013. Der Ausbau vervierfachte sich in dieser Zeit, war dann in 2015 und 2017 jedoch kurzfristig rückläufig. Mittlere Speichervolumina (5–50 m³ und 50–500 m³) sind die dominierenden Größenklassen. Große Speicher (> 5.000 m³) werden ab dem Jahr 2014 zunehmend gefördert und errichtet.

Abbildung 10

Schematische Darstellung des iKWK-Modell-Systems



Quelle: Eigene Darstellung

Das insgesamt geförderte Speichervolumen nimmt aufgrund der großen Speicher zu. Der Anteil der Größenklassen am geförderten Gesamtvolumen wird durch die Speicher > 5.000 m³ dominiert, wobei kleine Speicher < 50 m³ bezogen auf die geförderten Anlagen einen deutlich höheren Anteil haben (Prognos et al., 2019).

4.1.2 Innovative KWK (iKWK)

Innovative KWK-Systeme sind ausgewählte moderne Strom-Wärme-Systeme (Abbildung 10). Sie zeichnen sich durch den Einsatz von flexiblen, stromgeführten KWK-Anlagen in Verbindung mit hohen Anteilen innovativer erneuerbarer Wärme an der Wärmeversorgung aus. Sie nutzen in einem erheblichen Umfang erneuerbare Energien für die Bereitstellung von Wärme, so dass eine Wärmeversorgung mit geringen Treibhausgasemissionen im Vergleich zu konventionellen Strom-Wärme-Systemen gewährleistet werden kann. Zur Bereitstellung von Wärme werden dabei erneuerbare Energien, wie z. B. Solarthermie und Geothermie, sowie stromverbrauchende Techniken, wie beispielsweise Wärmepumpen unter Nutzung von Umweltwärme, neu installiert und eingesetzt.

Ausgehend vom heutigen Gebäudebestand berücksichtigen innovative KWK-Systeme, dass künftig der Heizwärmebedarf sinkt und sich die notwendigen Temperaturniveaus verändern werden. Zur Gewährleistung einer sicheren Wärmeversorgung und der Flexibilität bei der Stromerzeugung werden Power-to-Heat-Anlagen (mit erneuerbarem Strom) und Wärmespeicher eingesetzt. Die Kombination von verschiedenen Wärmetechniken in Verbindung mit Wärmenetzen und Wärmespeichern kann den Wärmebedarf zuverlässig decken und zugleich die Wärme- und Stromerzeugung vom Wärmebedarf zeitlich entkoppeln.

4.1.3 Ergebnisse der KWK- und iKWK-Ausschreibungen

Bei den KWK-Ausschreibungen wird auf Basis von Geboten die Höhe der Zuschlagszahlungen für Strom aus neuen oder modernisierten KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von mehr als 1 bis einschließlich 50 Megawatt und aus KWK-Anlagen, die Bestandteil von innovativen KWK-Systemen mit einer elektrischen Leistung von 1 bis 10 Megawatt sind, bestimmt. Die Gebote müssen sich auf

Tabelle 6

Ergebnisse der Ausschreibungsrunden für konventionelle KWK-Anlagen

Konventionelle KWK	1. Runde (01.12.2017)	2. Runde (01.06.2018)	3. Runde (03.12.2018)	4. Runde (03.06.2019)	5. Runde (02.12.2019)	6. Runde (02.06.2020)
Zuschläge						
Ausschreibungsvolumen (AV)	100 MW	93 MW	77 MW	51 MW	80 MW	75 MW
Zuschlagsgrenze	4,99 ct/kWh	AV nicht ausgeschöpft	5,24 ct/kWh	4,00 ct/kWh	AV nicht ausgeschöpft	AV nicht ausgeschöpft
Niedrigster Zuschlagswert	3,19 ct/kWh	2,99 ct/kWh	3,49 ct/kWh	3,93 ct/kWh	3,40 ct/kWh	4,70 ct/kWh
Höchster Zuschlagswert	4,99 ct/kWh	5,20 ct/kWh	5,24 ct/kWh	4,00 ct/kWh	6,84 ct/kWh	7,00 ct/kWh
Mittlerer Zuschlagswert	4,05 ct/kWh	4,31 ct/kWh	4,77 ct/kWh	3,95 ct/kWh	5,12 ct/kWh	6,22 ct/kWh
Anzahl Zuschläge	7	14	12	4	12	21
Zuschlagsvolumen	82 MW	91 MW	100 MW	46 MW	53 MW	69 MW
Zuschläge 1 bis 10 MW (nach Volumen)	20 MW	66 MW	46 MW	15 MW	42 MW	69 MW
Zuschläge 10 bis 20 MW (nach Volumen)	0	25 MW	11 MW	0	11 MW	0
Zuschläge 20 bis 30 MW (nach Volumen)	0	0	43 MW	0	0	0
Zuschläge 30 bis 40 MW (nach Volumen)	62 MW	0	0	32 MW	0	0
Zuschläge 40 bis 50 MW (nach Volumen)	0	0	0	0	0	0
modernisierte KWK-Anlagen (nach Volumen)	16 MW	15 MW	4 MW	4 MW	23 MW	24 MW
Gebote						
Niedrigster Gebotswert	3,19 ct/kWh	2,99 ct/kWh	3,49 ct/kWh	3,93 ct/kWh	3,40 ct/kWh	4,70 ct/kWh
Höchster Gebotswert	6,99 ct/kWh	5,20 ct/kWh	6,86 ct/kWh	6,98 ct/kWh	6,84 ct/kWh	7,00 ct/kWh
Mittlerer Gebotswert	5,16 ct/kWh	4,29 ct/kWh	5,08 ct/kWh	4,41 ct/kWh	5,03 ct/kWh	6,23 ct/kWh
Anzahl Gebote	20	15	18	13	13	22
Gebotsvolumen	225 MW	96 MW	126 MW	87 MW	58 MW	71 MW
modernisierte KWK-Anlagen (nach Volumen)	16 MW	15 MW	14 MW	29 MW	23 MW	26 MW
Gebote 1 bis 10 MW (nach Volumen)	66 MW	71 MW	72 MW	40 MW	47 MW	71 MW
Gebote 10 bis 20 MW (nach Volumen)	0	25 MW	11 MW	16 MW	11 MW	0
Gebote 20 bis 30 MW (nach Volumen)	0	0	43 MW	0	0	0
Gebote 30 bis 40 MW (nach Volumen)	62 MW	0	0	32 MW	0	0
Gebote 40 bis 50 MW (nach Volumen)	98 MW	0	0	0	0	0
Gebotsausschlüsse	0	1	3	0	1	1

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BNetzA (2020), Stand 23.06.2020

einen bestimmten anzulegenden Wert in Cent pro Kilowattstunde KWK-Strom (Gebotswert) und auf eine in Kilowatt anzugebende Anlagenleistung (Gebotsmenge) beziehen. Die Gebote mit den niedrigsten Gebotswerten erhalten einen Zuschlag, bis das Volumen des jeweiligen Gebotstermins erreicht ist. Wäre mit dem Nächsten zu bezuschlagenden Gebot das Ausschreibungsvolumen überschritten, so kommt dieses Gebot nicht mehr zum Zug. Das nicht vergebene Volumen wird der nächsten Ausschreibungsrunde zugeschlagen. Grundsätzlich ist das Ausschreibungsverfahren für jeden offen, erfordert jedoch eine Registrierung im Marktstammdatenregister. Für die KWK-Anlage an dem angegebenen Standort kann nur ein Gebot abgegeben werden und darüber hinaus kein wirksamer Zuschlag aus einem früheren Ausschreibungsverfahren bestehen. Der in der KWK-Anlage produzierte Strom darf während der gesamten Förderzeit nicht zur Eigenversorgung genutzt werden. Tabelle 6 stellt die Ergebnisse der durchgeführten Ausschreibungsrunden für das konventionelle Segment dar.

Der mittlere Zuschlagswert ist in den ersten drei Runden kontinuierlich leicht gestiegen, wobei er in der 4. Runde deutlich sank, um dann in der 5. Runde deutlich über den zuvor ermittelten mittleren Zuschlagswerten zu liegen (5,12 ct/kWh). In der 6. Runde wurde der bislang höchste mittlere Zuschlagswert erzielt (6,22 ct/kWh). Damit näherte sich der mittlere Zuschlagswert dem zulässigen Höchstwert in Höhe von 7 ct/kWh an. Die Anzahl der Zuschläge lag zwischen vier und 21. Der niedrigste Gebotswert schwankte über die sechs durchgeführten Ausschreibungsrunden zwischen 3,19 und 4,70 ct/kWh, der höchste Gebotswert mit Zuschlag lag bei 4,99 bis 7 ct/kWh. Die Anzahl der eingereichten Angebote lag zwischen 13 bis 22. Das Zuschlagsvolumen war in der zweiten, fünften und sechsten Ausschreibungsrunde jeweils unterzeichnet. Dem in der letzten Runde ausgeschriebenen Volumen (75 MW) standen Gebote i. H. v. 71 MW gegenüber, wovon alle bis auf ein Gebot bezuschlagt wurden.

Geboten und bezuschlagt wurden über die Runden vor allem Anlagen mit einem Volumen zwischen 1 bis 10 MW sowie zwischen 10 bis 20 MW. Dies sind Größenklassen die klassischerweise in der Objektversorgung und der öffentlichen Versorgung, teilweise auch in der Industrie zum Einsatz kommen.

Für innovative KWK-Systeme wurden erstmals am 1. Juni 2018 Ausschreibungen durchgeführt (Tabelle 7). Die ersten drei durchgeführten Runden waren unterzeichnet. In der ersten Runde mit fünf bezuschlagten und sieben eingereichten Geboten jedoch nur sehr leicht. In den darauffolgenden zwei Runden wurden alle Gebote bezuschlagt. In der 5. Runde wurde eine Zuschlagsgrenze von 10,98 ct/kWh erreicht, die Anzahl der Gebote (13, davon 1 unzulässig) überstieg die Anzahl der Zuschläge (8). Das letzte, teilweise im Ausschreibungsvolumen liegende Gebot konnte nicht bezuschlagt werden, da es zum größeren Teil die ausgeschriebene Menge überstieg. Die ausgeschriebene Menge konnte daher nur teilweise ausgeschöpft werden. Der mittlere Zuschlagswert stieg von 10,27 auf 11,31 ct/kWh in der zweiten Ausschreibungsrunde und näherte sich dem Höchstpreis von 12 ct/kWh an. Danach sank er bis in die letzte Runde auf 10,22 ct/kWh. Die höchsten bezuschlagten Gebotswerte lagen mit 10,94 bis 11,99 kWh ebenfalls nahe bzw. sehr knapp unter dem Höchstpreis, der niedrigste Gebotswert in der 1. Runde bei 6,5 bzw. in der 5. Runde bei 9,50 ct/kWh.

4.2 Gesetzliche Regelungen der Stromerzeugung mit Bezug zur KWK

4.2.1 Die EEG-Umlage und die Verbindung zum KWKG

Seit seiner Einführung im Jahr 2000 ist das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) das bedeutendste Förderinstrument für Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Es wurde in den letzten Jahren mehrmals novelliert. So wurde mit dem EEG 2017 ein Ausschreibungssystem für den Zubau von Windenergie an Land und auf See, Solaranlagen größer als 750 kW und Biomasseanlagen größer als 150 kW eingeführt, um einen kosteneffizienten und zielgerechten Ausbau der erneuerbaren Energien zu ermöglichen. Die von den Netzbetreibern an die geförderten Anlagen ausbezahlten Einspeisevergütungen bzw. Marktprämien werden bundesweit auf die gesamte an Endverbraucher gelieferte Strommenge umgelegt (EEG-Umlage). Gleichzeitig erhält jeder Stromkunde bilanziell entsprechend den gleichen Anteil an gefördertem EEG-Strom, welcher auf der Stromrechnung ausgewiesen wird.

Die EEG-Umlage ist seit Einführung des EEG, einerseits aufgrund des erfolgreichen Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeuger, andererseits aufgrund

Tabelle 7

Ergebnisse der Ausschreibungsrunden für iKWK-Anlagen

iKWK	1. Runde (01.06.2018)	2. Runde (03.12.2018)	3. Runde (03.06.2019)	4. Runde (02.12.2019)	5. Runde (02.06.2020)
Zuschläge					
Ausschreibungsvolumen (AV)	25 MW	29 MW	30 MW	25 MW	29 MW
Zuschlagsgrenze	AV nicht ausgeschöpft	AV nicht ausgeschöpft	AV nicht ausgeschöpft	11,20 ct/kWh	10,98 ct/kWh
Niedrigster Zuschlagswert	8,47 ct/kWh	7,99 ct/kWh	9,70 ct/kWh	9,38 ct/kWh	9,50 ct/kWh
Höchster Zuschlagswert	10,94 ct/kWh	11,97 ct/kWh	11,89 ct/kWh	11,20 ct/kWh	10,98 ct/kWh
Mittlerer Zuschlagswert	10,27 ct/kWh	11,31 ct/kWh	11,17 ct/kWh	10,25 ct/kWh	10,22 ct/kWh
Anzahl Zuschläge	5	3	5	5	8
Zuschlagsvolumen	21 MW	13 MW	22 MW	20 MW	26 MW
modernisierte KWK-Anlagen (nach Volumen)	2 MW	0 MW	0 MW	0 MW	0 MW
Gebote					
Niedrigster Gebotswert	6,50 ct/kWh	7,99 ct/kWh	9,70 ct/kWh	8,78 ct/kWh	9,50 ct/kWh
Höchster Gebotswert	10,94 ct/kWh	11,97 ct/kWh	11,89 ct/kWh	11,92 ct/kWh	11,99 ct/kWh
Mittlerer Gebotswert	9,98 ct/kWh	11,31 ct/kWh	11,17 ct/kWh	10,35 ct/kWh	10,63 ct/kWh
Anzahl Gebote	7	3	5	10	13
Gebotsvolumen	23 MW	13 MW	22 MW	43 MW	44 MW
modernisierte KWK-Anlagen (nach Volumen)	2 MW	0 MW	0 MW	0 MW	3 MW
Gebotsausschlüsse	2	0	0	1	1

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf BNetzA (2020), Stand 23.06.2020

des Merit-Order-Effekts, angestiegen. Seit einigen Jahren sind die Auswirkungen des weiteren Zubaus der erneuerbaren Kapazitäten gering, da die Kosten für die in Deutschland besonders relevanten Windenergie an Land und Photovoltaik stark gesunken sind. Da jedoch insbesondere die früh geförderten Anlagen hohe Fördersätze erhalten und ab Mitte der 2020 Jahre in relevantem Umfang das Ende des Förderzeitraums erreichen, soll die EEG-Umlage zukünftig absinken. Mit Einnahmen aus dem Verkauf der Emissionsrechte aus der nationalen CO₂-Bepreisung sowie mit einem Sonderzuschuss i. H. v. 11 Mrd. € aus dem zweiten Nachtragshaushalt

2020 (im Hinblick auf die Auswirkungen von Corona) soll die EEG-Umlage für betroffene Haushalte und Unternehmen ab 2021 zudem gesenkt werden.

Die Umlageeregungen im KWKG lehnen sich an die Regelungen im EEG an. Wird ein Unternehmen durch die Besondere Ausgleichsregelung im EEG 2017 entlastet, erfährt es auch nach dem KWKG eine Entlastung.

4.2.2 Eigenstromverbrauch und Anpassung der EEG Umlage für KWK-Anlagen

Neben der EEG-Umlage wird der Strom aus dem öffentlichen Netz mit weiteren Preisbestandteilen belastet, die der Finanzierung von energie- und

industriepolitischen Zwecken dienen. Bei lokal produziertem und verbrauchtem Strom werden die unterschiedlichen Strompreisbestandteile nicht oder nur zum Teil aufgeschlagen. Daher erscheint der Selbstverbrauch von Strom aus Eigenherzeugung attraktiv. Im Bereich der Objektversorgung und der industriellen KWK bietet der Eigenstromverbrauch aufgrund der Lastprofile gegenüber dem Netzbezug finanzielle Vorteile, weshalb der Anteil des selbstverbrauchten Stroms hier besonders hoch ist. In der Objektversorgung werden ca. 60 %, in der industriellen KWK über 80 % des erzeugten Stroms selbst verbraucht. So bewirkt das Selbstverbrauchsprivileg, dass sich Anlagen, die aus volkswirtschaftlicher Perspektive unwirtschaftlich sind, betriebswirtschaftlich durchaus rechnen können. Denn betriebswirtschaftlich kann durch die Abgabenbefreiung bei gegebenem Strom- und Wärmebedarf eine Objektversorgung sinnvoll sein, obwohl die Produktionskosten fast immer über den Marktpreisen und die spezifischen Investitionskosten deutlich höher liegen als die von (Groß-)Heizkraftwerken. Ähnliches gilt für industrielle KWK, die aufgrund des Wärmegrundlastprofils, der geringeren spezifischen Investitionskosten und einer geringeren Umlagenlast jedoch geringere Kosteneinsparungsmöglichkeiten pro Kilowattstunde aufweist. Durch das Selbstverbrauchsprivileg ergeben sich so aus einer volkswirtschaftlichen Betrachtung Mehrkosten, die durch den Umlagen-, Abgaben- und Steuerzahler zu tragen sind (LBD, 2015).

Um eine Angleichung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen untereinander, aber auch gegenüber der Nutzung von erneuerbaren Energien zu erreichen, wurden daher Neuregelungen im Rahmen der EEG-Umlage vorgenommen. Um einen fairen Wettbewerb innerhalb der Europäischen Union zu gewährleisten, wurden diese Neuregelungen 2019 rückwirkend zum 01.01.2018 vorgenommen.

Sie sehen vor, dass Betreiber von hocheffizienten KWK-Anlagen mit einem Monats- oder Jahresnutzungsgrad von mindestens 70 % und einer installierten Leistung bis 1 MW oder über 10 MW weiterhin eine uneingeschränkte EEG-Umlagenreduzierung auf 40 % erhalten. KWK-Neuanlagen mit einer Leistung von 1 MW bis 10 MW zahlen für die ersten 3.500 Vollbenutzungsstunden pro Jahr für selbsterzeugten Strom zum Eigenverbrauch auch weiterhin eine reduzierte EEG-Umlage von 40 %. Bei Anlagen mit höherer Auslastung steigt die durchschnittliche Umlage kontinuierlich an.

Betrachtet man den gesamten Eigenverbrauch, gelten bei mehr als 7.000 Vollbenutzungsstunden dann 100 %. Auch alle KWK-Neuanlagen in der stromintensiven Industrie zahlen 40 % der EEG-Umlage. Für neuere KWK-Anlagen, die zwischen dem 1. August 2014 und Ende 2017 errichtet wurden, sieht eine Sonderregelung eine abgestufte Übergangsregelung bis 2019 bzw. 2020 (EnSaG, 2018).

4.2.3 Vermiedene Netznutzungsentgelte

Zu den Förderungen, die KWK-Anlagen vom Marktpreis unabhängiger machen, zählen teilweise auch vermiedene Netznutzungsentgelte (vNNE). Dies sind Zahlungen an dezentrale Kraftwerke unterhalb der Höchstspannungsebene in Form von vermiedenen Netznutzungsentgelten auf Grundlage der Stromnetzzgeldverordnung (StromNEV, 2019). Die Zahlung orientiert sich in ihrer Höhe an den Netznutzungsentgelten, die für den Transport von der Höchstspannungsebene zurück zu der dem Kraftwerk tatsächlich vorgelagerten Netzebene verrechnet würden. Durch das Prinzip der vNNE sollten dezentrale, verbrauchsnahe Einspeisungen die eingesparte Netznutzung vergütet werden. Gezahlt wird dieses Entgelt jedoch nur noch für KWK-Anlagen, die bis zum 01.01.2023 in Betrieb genommen werden. Für neu gebaute volatile Erzeugungsanlagen gibt es bereits keine vNNE mehr. Zusammen mit den Wärmeerlösen und Eigenverbrauchsprivilegien kann sich für KWK-Anlagen eine Abkopplung von den Marktpreisen ergeben.⁶ Diese Anreize durch die verbliebenen vermiedenen Netzentgelte sollten abgeschafft oder zumindest so umgestaltet werden, dass sie nicht mehr Anreize hervorrufen, um Kraftwerke preisunelastisch zu fahren.

4.3 Förderprogramme zur Effizienzsteigerung mit Bezug zur KWK

Insgesamt erfährt die KWK durch die stromseitigen Regelungen indirekte sowie durch das KWKG direkte finanzielle Förderung, die Treiber für den Ausbau der KWK sind. Darüber hinaus erfährt die KWK auch auf der Energienachfrageseite Unterstützung im Rahmen verschiedener Förderprogramme, die insbesondere die Effizienzsteigerung im Gebäudebestand betreffen.

Die Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG) fördert Maßnahmen bei Neubau und Sanierung von Gebäuden. Die Bundesförderung bündelt dabei verschie-

⁶ Siehe Bundesnetzagentur: Bericht über die Mindestherzeugung 2019, S. 9.

dene Förderprogramme, etwa der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und das Marktanreizprogramm, um hierdurch eine Entbürokratisierung zu erreichen. Gleichzeitig werden auch die Fördersätze angehoben. Unter anderem fördert das BEG Neubauten und umfassende Sanierung als das „Effizienzhaus“, wenn sie die gesetzlichen Anforderungen um einen bestimmten Betrag unterschreiten. In dem Programm werden auch KWK-Anlagen als Bestandteil eines Effizienzhauses anteilig gefördert, wenn sie erneuerbare Energien nutzen und keine Förderung nach KWKG oder EEG in Anspruch genommen wird. Die Höhe der Förderung hängt vom erreichten Effizienzhaus-Standard ab und beträgt für Neubauten 12–25 %, für Sanierungen 25–45 % der Investitionskosten.

Um die Potentiale der KWK im Bereich kleinerer Objektversorgung (Wohngebäude) zu erschließen, erhalten Mini-KWK-Anlagen einen Investitionszuschuss durch die „Richtlinie zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kW_{el}“ (Mini-KWK-Richtlinie). In bestehenden Gebäuden wird mit einem einmaligen Investitionszuschuss, der nach der elektrischen Leistung der Anlage gestaffelt ist, gefördert. Zu den weiteren Förderbedingungen gehören unter anderem, dass die Anlagen nicht in einem Gebiet mit einem Anschluss- und Benutzungsgebot für Fernwärme liegen, dass sie mit einem Wartungsvertrag betreut werden und dass sie anspruchsvolle Effizienzanforderungen erfüllen. Mit der Änderung der Mini-KWK-Richtlinie wurde die Gültigkeit bis zum 31. Dezember 2020 begrenzt. Die Summe für die 1.538 geförderten Mini-KWK-Anlagen mit rund 8 MW elektrischer Leistung betrug 2016 in etwa 4,5 Mio. Euro. Im Jahre 2017 wurden 1.221 Mini-KWK-Anlagen (7 MW) mit rund 3,7 Mio. Euro gefördert (BHKW-Info, 2017).

Weitere direkte Förderung erhalten KWK-Anlagenbetreibende über Länderprogramme. Im Jahre 2015 existierten noch in 13 der 16 Bundesländer Förderprogramme. Im Jahre 2017 reduzierte sich diese Zahl erheblich. Die meisten Förderprogramme zielen auf die Förderung kleiner KWK-Anlagen in einem beschränkten Anwendungsfeld, etwa auf Wohn-, bzw. Nichtwohngebäude ab (Prognos et al., 2019).

4.4 Gesetzliche Regelungen der Nachfrageseite mit Bezug zur KWK

Neben der finanziellen Förderung der Effizienzsteigerung, werden auf der Nachfrageseite auch ordnungsrechtlich Impulse zur Nutzung effizienter

KWK gesetzt. Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) etwa führt für den Gebäudebereich bestehende Regelwerke, wie Energieeinsparungsgesetz (EnEG), Energieeinsparverordnung (EnEV) und Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) zusammen. Im Gesetz wird dabei der Bedarf an nicht-erneuerbarer Primärenergie für Neubauten und bei grundlegenden Sanierungen begrenzt. Dabei lässt das GEG zur Erfüllung einen Spielraum zwischen einer effizienteren Gebäudehülle und einer effizienteren Wärme-/Energieversorgung zu, wobei die Gebäudehülle ein Mindestmaß an Effizienz nicht unterschreiten darf. Dabei spielen die Primärenergiefaktoren eine wichtige Rolle.

Primärenergiefaktoren bewerten Energieträger anhand ihres Aufwandes an nicht-erneuerbarer Primärenergie. In KWK erzeugte Wärme wird mit der Stromgutschriftmethode bewertet (AGFW, 2014), die im Vergleich zu anderen Heiztechniken zu niedrigen Primärenergiefaktoren führt (vgl. Kapitel 3.1.2). Dadurch erhalten Gebäudeeigentümer einen Anreiz, KWK entweder direkt im Haus (BHKW) oder indirekt durch den Bezug von Fernwärme zu nutzen. Die Stromgutschriftmethode bewirkt jedoch, dass die Primärenergiefaktoren bei hohen elektrischen Nutzungsgraden unter Null fallen könnten und deshalb im GEG bei 0,3 gedeckelt werden. Je niedriger der Primärenergiefaktor der Wärmeversorgung ist, desto weniger effizient braucht die Gebäudehülle zu sein; bei Sanierungen kann im Extremfall auch keine zusätzliche Dämmung erforderlich sein. Damit handelt es sich aus Sicht der effizienten Energienutzung um einen systematischen Fehlanreiz. Daher sah der GEG-Entwurf 2018 (BMWi, 2018) vor, Wärme aus KWK ab 2021 mit der Carnot-Methode zu bewerten, die systematisch zu etwas höheren Primärenergiefaktoren führt; in der 2020 in Kraft getretenen Fassung ist nur noch vorgesehen, bis Ende 2025 eine Umstellung der Methode ab 2030 zu prüfen.

Das GEG enthält darüber hinaus die Pflicht, dass Neubauten einen Anteil ihres Wärme- und Kältebedarfs aus erneuerbaren Energien decken müssen. Alternativ dazu ist es möglich, Fernwärme zu nutzen, die zu mindestens 50 % aus KWK stammt. Weiter kann eine Objektversorgung aus hocheffizienter KWK erfolgen, sofern diese 50 % des Wärme- (und Kälte-)Bedarfs des Gebäudes deckt. Eine Objektversorgung ist auch durch eine Brennstoffzellenheizung möglich. Hier muss der Nutzungsanteil zur Deckung des Wärme- (und Kälte-)Bedarfs 40 % betragen.

4.5 Die Rolle der KWK im Europäischen Emissionshandel

Der Europäische Emissionshandel für stationäre Anlagen besteht seit 2005. Alle Anlagen, die der Erzeugung von Strom und/oder Wärme dienen und eine Feuerungswärmeleistung von mehr als 20 MW aufweisen, unterliegen der Emissionshandelspflicht: Die Betreiber müssen jährlich über ihre CO₂-Emissionen berichten und in dieser Höhe Emissionsberechtigungen abgeben. Einen Teil dieser Emissionsberechtigungen können die Betreiber der Anlagen auf Antrag kostenlos zugeteilt bekommen. Die Zuteilungsansprüche ergeben sich dabei stets aus den gesetzlichen Grundlagen, die sich in den verschiedenen Zuteilungsperioden deutlich unterscheiden und auch der KWK unterschiedliche Bedeutung zukommen ließen.

Die erste Handelsperiode 2005–2007

Anlagen konnten eine Zuteilung auf Grundlage ihrer Emissionen in vorhergehenden Jahren („Grandfathering“) oder wahlweise entsprechend einem „Benchmark-Ansatz“ erhalten. Beim Benchmark-Ansatz wurden für die Berechnung der kostenlosen Zuteilung die erwarteten Produktionsmengen⁷ von Strom und Wärme mit einem jeweils festgelegten Emissionswert (gCO₂/kWh, angelehnt an beste verfügbare Techniken) multipliziert. Für KWK-Anlagen war dieser als Optionsregel bezeichnete Zuteilungsansatz besonders interessant, da die Zuteilung für die Anlage hierbei so bemessen wurde, als würden die Produkte Strom und Wärme getrennt in einem Kessel und in einem Kraftwerk erzeugt („Doppelbenchmark“). Jedoch spiegelt sich der Effizienzvorteil der KWK gegenüber der getrennten Erzeugung in einem niedrigeren Brennstoffverbrauch, einer geringeren Emissionsmenge und folglich einer kleineren Menge Emissionsberechtigungen wider, die abzugeben waren. Effiziente KWK-Anlagen erhielten damit häufig deutlich mehr Berechtigungen kostenlos zugeteilt, als sie für ihre Abgabepflicht benötigten.

Zusätzlich konnte für alle KWK-Anlagen eine KWK-Sonderzuteilung (Zuteilungsgesetz (ZuG, 2007 (§ 14))) beantragt werden. Für rund 560 Anlagen machten Betreiber hiervon Gebrauch. Die Sonderzuteilung begründete der Gesetzgeber mit einem verringerten

stromseitigen Wirkungsgrad einer KWK-Anlage im Vergleich zu einer Kondensationsanlage (Kraftwerk). Die Bedeutung dieser Sonderzuteilung war im Vergleich zur regulären Zuteilung jedoch gering, ihr Beitrag lag regelmäßig nur bei wenigen Prozenten.

Die zweite Handelsperiode 2008–2012

Die kostenlose Zuteilung für größere Energieanlagen mit durchschnittlich mehr als 25.000 t CO₂/a erfolgte ausschließlich auf Grundlage des Benchmark-Ansatzes. Die KWK-Sonderzuteilung aus der ersten Handelsperiode wurde nicht weiter fortgeführt. Damit nahmen die KWK-Anlagen in den Zuteilungsregeln keine Sonderstellung mehr ein. Die Effizienzvorteile von größeren KWK-Anlagen gegenüber der getrennten Erzeugung wurden aber implizit durch den fortgeführten (Doppel-)Benchmarkansatz wie in der ersten Handelsperiode weiterhin honoriert.

KWK-Anlagen (und andere Energieanlagen), deren CO₂-Jahresemissionen in der Vergangenheit 25.000 t nicht überschritten, konnten den (Doppel-)Benchmarkansatz hingegen nicht nutzen. Sie erhielten eine Zuteilung nach dem Grandfathering-Ansatz entsprechend ihren historischen Emissionen. Bei diesem Ansatz werden Effizienzvorteile einer KWK-Anlage gegenüber der getrennten Erzeugung durch den Emissionshandel nicht honoriert.

Die dritte Handelsperiode 2013–2020

In dieser Handelsperiode fanden erstmals europaweit einheitliche Zuteilungsregeln Anwendung. Den Rechtsrahmen spannte die hierfür geänderte Emissionshandelsrichtlinie auf, in der zum einen festgelegt wurde, dass für die Erzeugung von Strom grundsätzlich keine kostenlose Zuteilung mehr gewährt wird. Zum anderen wurde geregelt, dass Anlagen, die als Stromerzeuger⁸ gelten, nur für die Erzeugung von Wärme eine Zuteilung erhalten können und dies auch nur, wenn die Wärme für die Fernwärmeversorgung genutzt wird oder die Wärme hocheffizient in KWK erzeugt wurde (s. Kapitel 3.1.1).

⁷ Mit der sogenannten „Ex-Post“-Korrektur wurden nachträglich ggf. überschätzte Produktionserwartungen korrigiert.

⁸ Als Stromerzeuger sind Anlagen zu verstehen, die ausschließlich wegen ihres Merkmals als Feuerungsanlage emissionshandelspflichtig sind und die nach dem 31.12.2004 Strom erzeugt und an andere Abnehmer verkauft haben. Heizkraftwerke, die Teil einer Anlage zur Herstellung von solchen Produkten sind, die die Emissionshandelspflicht der Anlage begründen, sind in diesem Sinne keine Stromerzeuger (z. B. Heizkraftwerke als Teil einer Raffinerie).

Wärme, die ungekoppelt in einer Anlage erzeugt wurde, die nicht als Stromerzeuger gilt – insbesondere in Heizwerken – ist nach der Richtlinie hingegen auch dann zuteilungsfähig, wenn sie nicht für die Fernwärmeversorgung genutzt wird und auch selbst dann, wenn ihre Erzeugung deutlich ineffizient erfolgt. Während an eine KWK-Anlage also Hocheffizienzanforderungen gestellt werden, bleiben reine Wärmeerzeuger hiervon vollständig befreit.

In der Entscheidung der Europäischen Kommission (KOM) über die detaillierten Zuteilungsregeln, die in Deutschland als Zuteilungsverordnung 2020 (ZuV, 2020) umgesetzt wurde, findet sich die Regelung aus der Richtlinie jedoch nur insoweit wieder, als dass für die Stromerzeugung keine Zuteilung gewährt wird. Für Wärme konnte unabhängig von den in der Emissionshandelsrichtlinie genannten Kriterien – entweder Fernwärme oder hocheffizient in KWK erzeugte Wärme – eine Zuteilung beantragt und gewährt werden. Die Höhe der Zuteilung folgt aus der historischen Wärmeproduktion in einem Bezugszeitraum und ihrer Bewertung mit einem Wärmebenchmark (Wärme-Emissionswert) und ist damit unabhängig davon, ob die Wärme gekoppelt oder ungekoppelt erzeugt wurde.

In einem Urteil des Europäischen Gerichtshofs stellte dieser im Frühjahr 2019 jedoch fest, dass ein Zuteilungsanspruch für die Erzeugung von Wärme

nur dann begründet ist, wenn die Verwendung von Wärme als Fernwärme oder die Herstellung der Wärme in hocheffizienter KWK gegeben ist.

Die vierte Handelsperiode 2021–2030

Die erneut geänderte Emissionshandelsrichtlinie (EU, 2003, 2008) gilt bezgl. der Anforderungen für die kostenlose Zuteilung von Emissionsberechtigungen für Wärme im Wesentlichen unverändert fort. Die Zuteilungsregeln im Einzelnen sind in der Europäischen Zuteilungsverordnung (EU-ZuVO, 2018) einheitlich für alle Mitgliedsstaaten geregelt. Vor dem Hintergrund des o. g. EuGH-Urteils hat die KOM in das bereits gestartete Zuteilungsverfahren für die vierte Handelsperiode eingegriffen und die Mitgliedsstaaten zur Prüfung der Voraussetzungen entsprechend der Richtlinie aufgefordert. Hier werden die Vorgaben der Effizienzrichtlinie (EU, 2012) und der mit dieser verbundenen Verordnung (EU, 2015) als Maßstab für das Merkmal „hocheffizient erzeugt in KWK“ angelegt. Im Ergebnis werden in der vierten Handelsperiode alle KWK-Anlagen, für die keine in hocheffizienter KWK erzeugte Wärme nachgewiesen werden kann und die auch keine Fernwärmelieferung im Sinn der EU-ZuVO geltend machen können, insoweit keine kostenlose Zuteilung für Wärme mehr erhalten. Gleiches gilt für Anlagen, die ausschließlich getrennt Strom und Wärme erzeugen. Der Zuteilungsanspruch für Heizwerke (ohne KWK-Block) bleibt hingegen unverändert und ohne Effizienzanforderungen bestehen.

5 Ausblick: Merkmale des Energiesystems in 2050 und die zukünftige Rolle der KWK

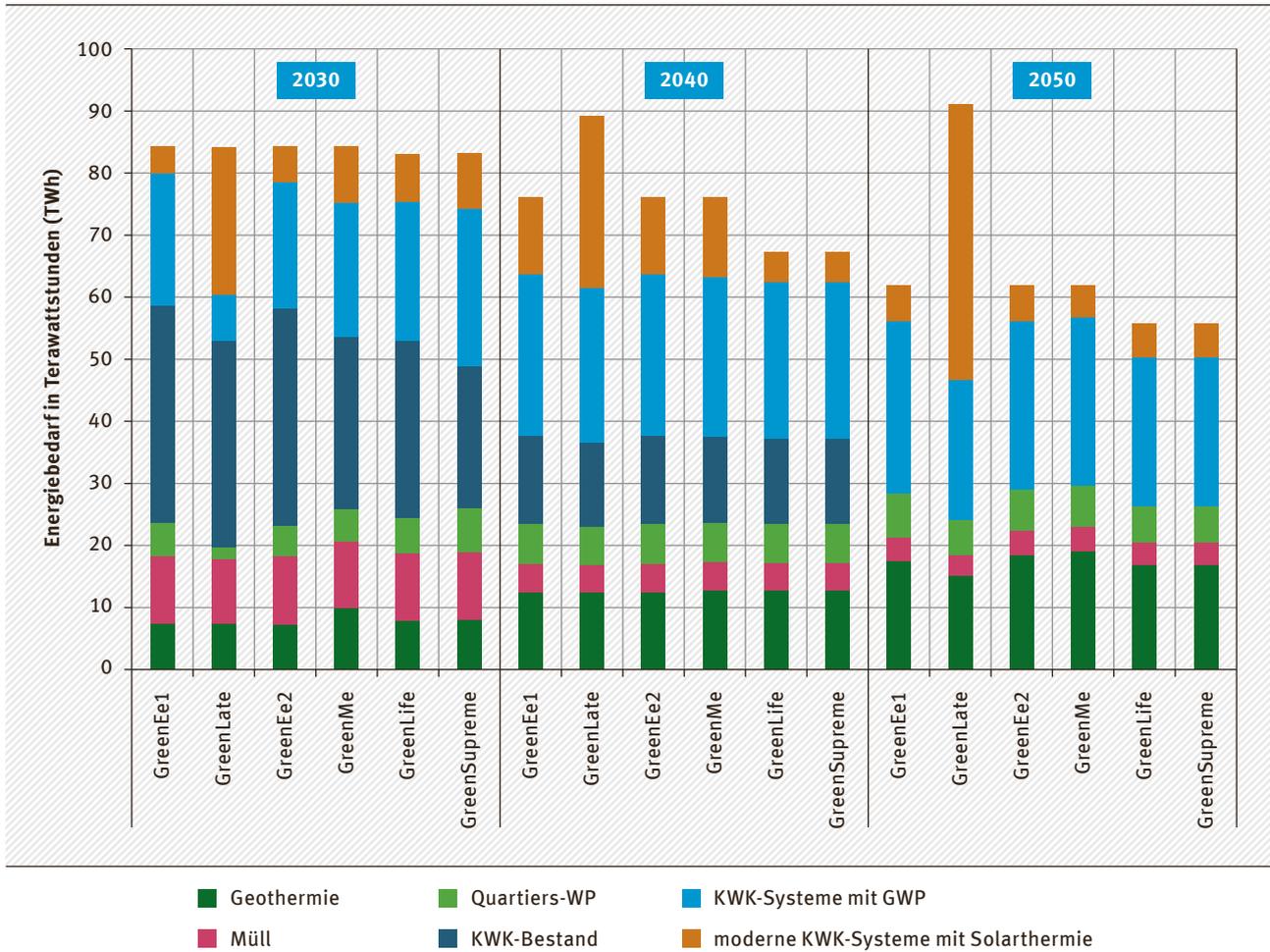
Der vollständige Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger für energetische und nichtenergetische Anwendungen ist sowohl aus Klima- als auch aus Ressourcenschutzperspektive unabdingbar. Ein Festhalten an fossilen Energien führt dauerhaft zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre und dauerhaft steigender Primärrohstoffinanspruchnahme. Der technisch mögliche, vollständige Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger ist für das Erreichen der Klimaziele bis spätestens 2050 notwendig. Durch diesen Wandel im

Energiesystem wird sich auch die Rolle der KWK und ihr Beitrag zu einer treibhausgasneutralen Energieversorgung verändern.

Die UBA-Studie RESCUE untersucht in unterschiedlichen Szenarien die Entwicklung bis 2050. Dabei betrachtet sie auch die Rolle der KWK in der Energieversorgung allgemein, sowie im Bereich der leitungsgebundenen Wärmeversorgung im Speziellen. In den meisten der sechs Szenarien (*GreenEe1*, *GreenEe2*, *GreenMe* und *GreenLife*) ist in den Stützjahren 2030 und 2040 noch ein Zubau an Gas-KWK-

Abbildung 11

Entwicklung der Fernwärmeversorgung



Quelle: UBA (2019a)

Anlagen im Vergleich zu heute zu verzeichnen, der bis 2050 jedoch wieder unter 5 GW und unter den heutigen Kapazitäten liegt. Die Volllaststunden der gasbasierten KWK-Systeme reduzieren sich dabei bis 2050 deutlich gegenüber dem heutigen Stand. Für das *GreenLate*-Szenario, welches grundsätzlich einen ineffizienteren Pfad im Vergleich zu den anderen Szenarien skizziert und in dem die Treibhausgas-minderungen in der Energieversorgung bis 2040 in geringerem Maße erfolgen, ergibt sich ein Ausbau der Gas-KWK-Kapazitäten (UBA, 2019a).

Im Bereich der leitungsgebundenen Wärmeversorgung vollziehen in den *Green*-Szenarien alle Kraft-Wärme-Kopplungssysteme einen Wandel. Die netzgebundene Versorgung leisten zukünftig zunehmend innovative und moderne KWK-Systeme basierend auf Großwärmepumpen, Abwasser-Großwärmepumpen, Solarthermie und Müllheizkraft-

werke kombiniert mit flexibler Gas-KWK-Erzeugung und dem flexiblen Einsatz von Speichern und PtH. Während 2030 die leitungsgebundene Wärmeversorgung noch durch den Fortbestand heutiger KWK-Anlagen geprägt ist, werden diese in den Folgejahren zunehmend durch innovative und moderne KWK-Systeme ersetzt und von diesen bis 2050 vollständig verdrängt. Die Entwicklungen der Fernwärmeversorgung sind in Abbildung 11 dargestellt. Dabei wird in den Szenarien unterstellt, dass der Anschlussgrad sich deutlich erhöht und Fernwärme mindestens 20% der Raumwärme- und Warmwasserbedarfe des Gebäudebestands deckt. In den ambitioniertesten Szenarien werden sogar rund 24% angenommen.

Dabei ist zu beachten, dass zum Erreichen der Klimaziele auch beim Gebäudebestand eine grundlegende Transformation notwendig sein wird. So sehen fast alle Studien die Notwendigkeit eines besonders

effizienten Gebäudebestands im Jahr 2050. In den Szenarien der RESCUE-Studie halbiert sich der Endenergiebedarf des Gebäudebestands zwischen 2030 und 2050 nahezu – hauptsächlich getrieben durch ambitionierte Sanierung fast aller Bestandsgebäude und energetisch hochwertigen Neubau. Damit sinken in dieser Zeit auch die absoluten Energiemengen, welche durch Fernwärme bereitgestellt werden, während der relative Anteil der Fernwärme an der Wärmeversorgung wie beschrieben steigt. Es wird angenommen, dass der erhöhte Anschlussgrad an die Fernwärme den Rückgang der Wärmenachfrage der einzelnen Gebäude zumindest teilweise ausgleichen kann. Dies bedeutet sowohl Ausbau und Nachverdichtung von bestehenden Wärmenetzen als auch der Neubau.

Nach heutiger Einschätzung wird das Energiesystem im Jahr 2050 von sehr hohen Flexibilitätsanforderungen geprägt sein, da die Stromversorgung komplett auf erneuerbaren Energien und im Wesentlichen auf dargebotsabhängigen Energien (wie Windenergie und Photovoltaik) basieren wird. Erneuerbare Energien, flexible Verbraucher, Speicher und moderne Netzbetriebsmittel werden einen erheblichen Anteil der Systemdienstleistungen übernehmen, und es wird keine Mindesterzeugung von konventionellen Kraftwerken mehr bestehen. Auch KWK-Anlagen können situationsabhängig Systemdienstleistungen übernehmen, wenn sie zur Stromerzeugung ohnehin betrieben werden.

KWK-Anlagen werden nicht nur zum Bereitstellen von Systemdienstleistungen betrieben, aber gegenüber heute dramatisch reduzierte Volllaststunden aufweisen. Die Verfügbarkeit von erneuerbaren Brennstoffen wird auch im Jahr 2050 begrenzt sein. Die Bereitstellung von synthetisch mittels Power-to-Gas (PtG) erzeugten Brennstoffen (wie Wasserstoff oder Methan) ist mit einer hohen zusätzlichen Nettostromerzeugung und dementsprechenden Kosten verbunden. Es ist anzunehmen, dass treibhausgasneutrale synthetische Brennstoffe vorrangig zur Treibhausgasmin-

derung in anderen Anwendungsbereichen benötigt werden. Diese Nutzungskonkurrenz zwischen dem Einsatz in KWK-Anlagen und anderen Anwendungsbereichen und die zu erwartende Kostenstruktur werden voraussichtlich zu einem begrenzten Einsatz synthetischer Brennstoffe in der KWK führen. Neben synthetischen Brennstoffen können auch Abfälle, Reststoffbiomasse oder Geothermie zum Einsatz in KWK-Anlagen kommen. Aber auch diese Potenziale sind lokal unterschiedlich und begrenzt, so dass die zukünftige Rolle der KWK im Energiesystem stark von der Verfügbarkeit und den Preisen von treibhausgasneutralen synthetischen erzeugten Brennstoffen abhängen wird.

Auch bei der Wärmeversorgung befindet sich die KWK zukünftig im Spannungsfeld zwischen Substitution der Technik (z. B. ist die direktelektrische Wärmeerzeugung mittel PtH in einigen Industriebranchen möglich) und der Substitution des Energieträgers (etwa durch treibhausgasneutrale synthetische Brennstoffe aus PtG). Nur ein Teil der heutigen Prozesswärmebedarfe wird noch langfristig durch KWK-Anlagen bedient werden.

Künftige Wärmenetze werden erneuerbare Wärme und Abwärme (unterschiedlicher Wärmequellen auf unterschiedlichen Temperaturniveaus) transportieren – vor allem in dicht besiedelte Gebiete, in denen nur bedingt ein direkter räumlicher Zugang bzw. ein begrenztes Potenzial an erneuerbarer Wärme besteht. In einem solchen System sind nur moderne und flexible Strom-Wärme-Systeme zukunftsfähig. Diese zeichnen sich durch die Verbindung einer Strom-Wärme-gekoppelten Brennstoffeuerung mit systemflexibilisierenden und effizienten Techniken der erneuerbaren Wärmebereitstellung – wie Solarthermie, direktelektrischer PtH und Großwärmepumpen – aus. Diese modernen und flexiblen KWK-Systeme werden vor allem dann zum Einsatz kommen, wenn die Versorgung der Wärmenetze nicht oder nicht komplett durch erneuerbare Wärme substituiert werden kann.

6 Quellenverzeichnis

AGFW (2014): FW 309 Teil 1, Energetische Bewertung von Fernwärme – Bestimmung der spezifischen Primärenergiefaktoren für Fernwärmeversorgungssysteme. Frankfurt am Main, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.

AGFW (2018): AGFW Hauptbericht 2017. Frankfurt am Main, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.

BAFA (2020a): Vom BAFA nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz zugelassenen Wärme- und Kältespeicher. Datenstand vom 09.04.2020. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.

BAFA (2020b): Vom BAFA nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz zugelassenen Wärme- und Kältenetze. Datenstand vom 09.04.2020. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.

BAFA (2020c): Vom BAFA im Antragsverfahren zugelassenen KWK-Anlagen mit Inbetriebnahme ab 2009 sowie ab dem 01.01.2009 nach der „Allgemeinverfügung für KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 50 kWel“ zugelassenen KWK-Anlagen. Datenstand vom 09.04.2020. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.

Baten, T., Buttermann, H. G. und Nieder, T. (2017): Kraft-Wärme-Kopplung 2008 bis 2016 – Einfluss der Bilanzgrenze. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 67. Jg. (2017) Heft 12.

BauNVO (2017): Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. November 2017 (BGBl. I S. 3786). Bundesamt für Justiz.

BHKW-Info (2017): „Förderbericht Mini-KWK-Impulsprogramm 2016 – Mehr Mini-KWK-Anlagen gefördert.“ Abrufdatum 22.05.20, von <http://www.mini-kwk-impulsprogramm.de/aktuelles/foerderbericht-2016>.

BImSchG (2019): Bundes-Immissionsschutzgesetz, Neugefasst durch Bek. v. 17.05.2013 I 1274; zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 08.04.2019 I 432. Bundesamt für Justiz.

BImSchV (2017): Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Mai 2017 (BGBl. I S. 1440). Bundesamt für Justiz.

BImSchV (2019): Vierundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über mittelgroße Feuerungs- Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen – 44. BImSchV), Verordnung über mittelgroße Feuerungs- Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen vom 13. Juni 2019 (BGBl. I S. 804). Bundesamt für Justiz.

BMWi (2018): Entwurf eines Gesetzes zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude, für die Ressortabstimmung (22.11.2018). Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

BMWi (2019): Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende – Die Energie der Zukunft Berichtsjahr 2017. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

BMWi (2020): Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan gemäß der Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Richtlinie 94/22/EG, der Richtlinie 98/70/EG, der Richtlinie 2009/31/EG, der Verordnung (EG) Nr. 663/2009, der Verordnung (EG) Nr. 715/2009, der Richtlinie 2009/73/EG, der Richtlinie 2009/119/EG des Rates, der Richtlinie 2010/31/EU, der Richtlinie 2012/27/EU, der Richtlinie 2013/30/EU und der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

BNetzA (2020): Beendete Ausschreibungen Ergebnisse der Ausschreibungsrunden für KWK-Anlagen und iKWK-Anlagen. Datenstand vom 02.06.2020. Bonn, BNetzA.

Böhm, W., Danner, J., Dutzi, R., Schlichter, E. und Stöcklein, F. (2010): Ermittlung des Standes der Emissionsminderungstechnik bei Verbrennungsmotoranlagen, Ermittlung technischer Grundlagen für immissionsschutzrechtliche Anforderungen an diese Anlagen. Teilvorhaben 05, Paket 3: Erdgas. Dessau-Rosslau, Umweltbundesamt.

BR (2019): Fortschrittsbericht nach Artikel 22 der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Unveröffentlicht, Bundesrepublik Deutschland.

de Zwart, M., van Dijk, G. und Klimstra, J. (2012): Methane emissions from gas engines driving combined heat and power installations. Journal of Integrative Environmental Sciences 9(sup1): 113–125.

EnSaG (2018): Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes, des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften (Energiesammelgesetz – EnSaG) vom 17. Dezember 2018. In der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Dezember 2018 (BGBl. I Nr. 47, S. 2522).

EU-ZuVO (2018): Delegierte Verordnung (EU) 2019/331 der Kommission vom 19. Dezember 2018 zur Festlegung EU-weiter Übergangsvorschriften zur Harmonisierung der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten gemäß Artikel 10a der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates Amtsblatt der Europäischen Union.

EU (2003): Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Union und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates (Text von Bedeutung für den EWR) Amtsblatt der Europäischen Union.

EU (2012): Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG (ABl. L 315 vom 14.11.2012, S. 1), die zuletzt durch die Richtlinie 2013/12/EU (ABl. L 141 vom 28.05.2013, S. 28) geändert worden ist Amtsblatt der Europäischen Union.

EU (2013): Verordnung (EU) Nr. 813/2013 der Kommission vom 2. August 2013 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Raumheizgeräten und Kombiheizgeräten Text von Bedeutung für den EWR. Amtsblatt der Europäischen Union.

- EU (2015):** Delegierte Verordnung (EU) 2015/2402 der Kommission vom 12. Oktober 2015 zur Überarbeitung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte für die getrennte Erzeugung von Strom und Wärme gemäß der Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung des Durchführungsbeschlusses 2011/877/EU der Kommission. Amtsblatt der Europäischen Union.
- EU (2018):** Richtlinie (EU) 2018/410 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2018 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Unterstützung kosteneffizienter Emissionsreduktionen und zur Förderung von Investitionen mit geringem CO₂-Ausstoß und des Beschlusses (EU) 2015/1814 (Text von Bedeutung für den EWR.). Amtsblatt der Europäischen Union.
- Gores, S. und Nissen, C. (2019):** BHKW-Markt 2018 auf dem Absatz-Gipfel? BHKW-Ranking 2019. Energie & Management.
- Hübelt, J. und Schulze, C. (2014):** Lärminderung bei Mikro-BHKW (SILENA-Studie), Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Schriftenreihe des LfULG, 8/2014.
- IFEU, Richtvert und Fraunhofer IBP (2016):** Die Nutzung von Exergieströmen in kommunalen Strom-Wärme-Systemen zur Erreichung der CO₂-Neutralität von Kommunen bis zum Jahr 2050 – Endbericht. Climate Change 35/2016. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- IFEU, prognos, Ecofys und dena (2018):** Untersuchung zu Primärenergiefaktoren Endbericht. Leistung gemäß Rahmenvertrag zur Beratung der Abteilung II des BMWi. Heidelberg, Berlin, IFEU prognos Ecofys dena.
- IFEU, IZES und ÖkolInstitut (2019):** BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). Climate Change 115/2019. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- IKEM (2018):** Power to Heat Eine Chance für die Energiewende – Positionspapier. Berlin, Greifswald, Stuttgart, IKEM – Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.
- IVU Umwelt und solaresbauen (2019):** Auswirkungen dezentraler Energieversorgung durch Blockheizkraftwerke auf die Luftqualität in Ballungsräumen. Climate Change 38/2019. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- KWKG (2020):** Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz – KWKG). „Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 21. Dezember 2015 (BGBl. I S. 2498), das zuletzt durch Artikel 7 des „Gesetz[es] zur Reduzierung und Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz)“ vom 13. August 2020 (BGBl. I, Nr 37, S. 1853–1864) geändert worden ist“. Bundesamt für Justiz.
- LAI (2020):** Leitfaden für die Verbesserung des Schutzes gegen Lärm bei stationären Geräten (Klimageräte, Kühlgeräte, Lüftungsgeräte, Luft-Wärme-Pumpen und Mini-Blockheizkraftwerke) aktualisiert durch Beschluss der 139. LAI-Sitzung vom 24.03.2020. Bund-/Länder-Arbeitsgemeinschaft Immissionsschutz.
- LBD (2015):** Die Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung in der Energiewende. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin, Agora Energiewende.
- nova-Institut, IFEU, Finanzwissenschaftliches Forschungsinstitut an der Universität zu Köln und ÖkolInstitut (2014):** Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse – Langfassung. Climate Change 01/2014. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- ÖkolInstitut (2015):** Methodenpapier zur Bewertung von KWK-Anlagen in mittelfristiger Perspektive bis 2030. Freiburg, Öko Institut.
- ÖkolInstitut (2018):** Korrektur der KWK-Stromerzeugung in der amtlichen Statistik. Freiburg, Öko Institut.
- Pehnt, M. und Schneider, J. (2010):** Kraft-Wärme-Kopplung. Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. Pehnt, M. Berlin, Springer: 117–146.
- Prognos, IFAM, ÖkolInstitut, BHKW-Consult und Stiftung Umweltenergierecht (2019):** EVALUIERUNG DER KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG Analysen zur Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in einem Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Berlin.
- StaBa (2020a):** Industrielle Kraftwirtschaft Erhebung 067. Statistisches Bundesamt.
- StaBa (2020b):** Allgemeine Versorgung Erhebung 066k. Statistisches Bundesamt.
- StromNEV (2019):** Stromnetzentgeltverordnung vom 25. Juli 2005 (BGBl. I S. 2225), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 23. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2935) geändert worden ist. Bundesamt für Justiz.
- TALärm (2017):** Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm). Vom 26. August 1998 (GMBl Nr. 26/1998 S. 503), Geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 01.06.2017 (BAnz AT 08.06.2017 B5). Bundesamt für Justiz.
- UBA (2013a):** Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- UBA (2013b):** Strom- und Wärmeversorgung einer Siedlung bei unterschiedlichen Energieeffizienz-Standards. Climate Change 10/2013. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- UBA (2018):** Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016. Climate Change 12/2018. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- UBA (2019a):** Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE: Langfassung. Climate Change 36/2019. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- UBA (2019b):** Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990–2018. Climate Change 10/2019. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- ZuG (2007):** Gesetz über den nationalen Zuteilungsplan für Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2005 bis 2007 (Zuteilungsgesetz 2007 – ZuG 2007) „Zuteilungsgesetz 2007 vom 26. August 2004 (BGBl. I S. 2211), das zuletzt durch Artikel 4 Absatz 28 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist“. Bundesamt für Justiz.
- ZuV (2020):** Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Handelsperiode 2013 bis 2020 (Zuteilungsverordnung 2020 – ZuV 2020) Zuteilungsverordnung 2020 vom 26. September 2011 (BGBl. I S. 1921), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Juli 2017 (BGBl. I S. 2354) geändert worden ist“. Bundesamt für Justiz.



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurmlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/