

DAS POTENZIAL DER KWK FÜR DIE TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALEN ENERGIEVERSORGUNG

Bericht für Zukunft Gas e.V.

05. Juli 2022

INHALT

Abkürzungsverzeichnis	V
Glossar	VII
Vorwort	1
Zusammenfassung	3
1 Anforderungen an eine klimaneutrale Energieversorgung	11
1.1 Ziel von Klimaneutralität bis 2045 und ambitionierte Zwischenziele auf dem Weg dahin	11
1.2 Resultierende Anforderungen an eine klimaneutrale Energieversorgung	14
2 KWK-Potenzial in der Wärmeversorgung	19
2.1 Zusammenfassung	19
2.2 Die Transformation der Wärmeversorgung ist eine große Herausforderung	23
2.3 Wärmeversorgung für Gebäude und Industrie erfordert eine Vielfalt an Technologien	29
2.4 In einem zunehmend durch Wind- und Sonnenenergie geprägten System muss und kann KWK zukünftig flexibler eingesetzt werden	42
3 KWK-Potenzial in der Stromversorgung	49
3.1 Zusammenfassung	49
3.2 Anforderungen an die Transformation zur Klimaneutralität in der Stromversorgung	52
3.3 Wasserstofffähige Gaskraftwerke als Rückgrat des deutschen Stromsystems	56
3.4 Kopplung von wasserstofffähiger gasbasierter Stromerzeugung mit Wärmeerzeugung als KWK bringt zusätzliche Vorteile	60
3.5 KWK im Einsatz für systemdienliche Strom- und Wärmeerzeugung	61
4 Transformationspfade für eine klimaneutrale KWK	66
4.1 Zusammenfassung	66
4.2 KWK-Kapazitäten als wichtige Säule der Strom- und Wärmeversorgung in Deutschland weiter ausbauen	67
4.3 Flexibilität aus KWK-Anlagen erschließen	73
4.4 KWK schrittweise defossilisieren	77
5 Handlungsempfehlungen	83
5.1 Rahmenbedingungen zum Erhalt und Zubau von KWK	83
5.2 Rahmenbedingungen zur Flexibilisierung von KWK	88
5.3 Rahmenbedingungen zur Defossilisierung von KWK	93
Literaturverzeichnis	99
Anhang A Steckbriefe der Wärmeversorgungs-lösungen	106

DAS POTENZIAL DER KWK FÜR DIE TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALEN ENERGIEVERSORGUNG

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	anno (Jahr)
BEW	Bundesförderung für effiziente Wärmenetze
BGH	Bundesgerichtshof
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CCS	Carbon Capture and Storage (CO ₂ -Abscheidung und Speicherung)
CCU	Carbon Capture and Usage (CO ₂ -Abscheidung und Weiternutzung)
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -eq	CO ₂ -Äquivalente
COP	Coefficient of Performance
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DSM	Demand Side Management
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
el	elektrisch
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EU ETS	EU Emissions Trading System/Europäischer Emissionshandel
FKW	Fluorierte Kohlenwasserstoffe
FNB	Ferngasnetzbetreiber
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GW	Gigawatt
HFKW	Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe
H ₂	Wasserstoff
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
iKWK	Innovative KWK
KSG	Klimaschutzgesetz
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
MW	Megawatt

DAS POTENZIAL DER KWK FÜR DIE TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALEN ENERGIEVERSORGUNG

MWh	Megawattstunde
MW _{th}	Megawatt thermisch
nETS	National Emissions Trading System/Nationaler Emissionshandel
NF ₃	Stickstofftrifluorid
N ₂ O	Lachgas
O	Sauerstoff
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
PtL	Power-to-Liquids
PV	Photovoltaik
PW	Prozesswärme
RW	Raumwärme
SF ₆	Schwefelhexafluorid
StromStG	Stromsteuergesetz
th	thermisch
THG	Treibhausgas
TWh	Terrawattstunde
TWh/a	Terrawattstunde pro Jahr
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VKU:	Verband kommunaler Unternehmen
VLH	Volllaststunde
VNB	Verteilnetzbetreiber
WW	Warmwasser

GLOSSAR

Um eine konsistente und unmissverständliche Verwendung von Begriffen sicherzustellen, definieren wir nachfolgend wesentliche im Rahmen dieser Studie relevante Begriffe:

- **Biogas:** Beschreibt Gas, das durch anaerobe Vergärung von Biomasse gewonnen wird.¹ Es wird in der Regel in Biogasanlagen hergestellt, wozu sowohl Abfälle als auch nachwachsende Rohstoffe vergoren werden. Der Einsatz des Gases erfolgt heutzutage überwiegend vor Ort in stationären KWK-Anlagen. Der CO₂-Fußabdruck hängt wesentlich von der eingesetzten Biomasse ab.
- **Biomethan:** Bezeichnet jedes Biogas oder sonstige gasförmige Biomasse, das oder die aufbereitet und in das Erdgasnetz eingespeist worden ist.²
- **CO₂:** Bezeichnet das Treibhausgas Kohlendioxid. Da CO₂ den größten Teil der freigesetzten Treibhausgase ausmacht (in Deutschland derzeit etwa 87 %), werden die Emissionen der anderen Treibhausgase wie z. B. Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) zur besseren Vergleichbarkeit häufig entsprechend ihrem globalen Erwärmungspotenzial in CO₂-Äquivalente (CO₂-eq) umgerechnet. 1g CO₂ entspricht dabei 1g CO₂-Äquivalent, 1g Methan entspricht aufgrund des größeren Erderwärmungspotenzials von Methan z.B. 25g CO₂-Äquivalent. In der Klimadebatte – und auch in dieser Studie – wird häufig vereinfacht der Begriff CO₂ als Äquivalent für Treibhausgase verwendet. Siehe auch die Erläuterung zu Treibhausgas.
- **CO₂-Fußabdruck:** Ein Ansatz der Ökobilanzierung, der die Klimawirkungen menschlicher Aktivitäten betrachtet. Wie unter dem Begriff „CO₂“ erläutert, wird hier CO₂ als Äquivalent für alle Treibhausgasemissionen verwendet. Unter dem CO₂-Fußabdruck müssen entsprechend alle THG-Emissionen bilanziert werden.
- **Defossilisierung:** Unter Defossilisierung versteht man die Substitution von fossilen Energiequellen durch erneuerbare Energiequellen. Die „Defossilisierung“ lässt die Nutzung von Kohlenstoff in einem Kreislauf weiterhin zu (z. B. in Form von Biomasse oder synthetischem Methan unter Verwendung von aus der Luft abgeschiedenem CO₂), impliziert jedoch eine Beendigung des Ausstoßes von CO₂ aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe.
- **Dekarbonisierung:** Unter Dekarbonisierung versteht man die Reduzierung kohlenstoffhaltiger Emissionen, vor allem durch die Abkehr von fossilen Energieträgern und die Reduktion bzw. den Verzicht auf kohlenstoffhaltige Rohstoffe.
- **Dezentrale Energieversorgung:** Lokale, verbrauchsnahe Versorgungsform, welche die bestehende zentrale Versorgung ergänzt und ggf. ersetzt. Zur dezentralen Energieversorgung zählen zum Beispiel Biomassekraftwerke, BHKW und Photovoltaik, sowie häufig auch Onshore-Windkraftanlagen. Bei der

¹ EEG (2021).

² Ebd.

dezentralen Stromerzeugung erfolgt die Einspeisung in der Regel in Mittel- und Niederspannungsnetzen.

- **Endenergie:** Energie, die beim Verbraucher ankommt, etwa in Form von Brennstoffen, Kraftstoffen oder elektrischer Energie. Endenergie ist von Primärenergie und Nutzenergie zu unterscheiden (siehe Definitionen).
- **Energiespeicher:** Anlagen, die Energie mit dem Ziel der elektrischen, chemischen, elektrochemischen, mechanischen oder thermischen Speicherung aufnehmen und einer zeitlich verzögerten Nutzung, z. B. für Stromwendungen oder Wärmebedarf, wieder zur Verfügung stellen.
- **Energieträger:** Energieträger sind Stoffe, deren Energiegehalt für Energieumwandlungsprozesse wie die Strom- und Wärmeerzeugung nutzbar ist. In dieser Studie unterscheiden wir folgende Energieträger:
 - **Dekarbonisierter Energieträger:** Energieträger, die kein CO₂ freisetzen (z. B. Windenergie) bzw. in einigen Fällen sogar CO₂ binden (z. B. Biomasse in Verbindung mit Carbon Capture and Storage, CCS).
 - **Emissionsarmer Energieträger:** Energieträger, die im Vergleich zu fossilen Energieträgern bei der Nutzung (z.B. Verbrennung zur Strom- und/oder Wärmeerzeugung) nur eine geringe Menge an CO₂ freisetzen. Darunter fällt zum Beispiel blauer Wasserstoff, bei dem bis zu 95 % des CO₂-Ausstoßes im Umwandlungsprozess abgeschieden und unterirdisch gespeichert wird³.
 - **Erneuerbarer Energieträger:** Energieträger, die aus erneuerbaren, d. h. nicht erschöpflichen Quellen wie Sonne, Wind und Biomasse gewonnen werden.
 - **Fossiler Energieträger:** Energieträger, die der erdzeitlichen Frühgeschichte infolge des Abbaus von toten Pflanzen und Tieren entstanden sind, und bei der Nutzung CO₂ freisetzen, wie zum Beispiel Kohle, Erdöl und Erdgas.
 - **Klimaneutraler Energieträger:** Energieträger, die bei der Nutzung nicht mehr CO₂ freisetzen als sie kurz zuvor gebunden haben (z. B. Biomasse). Dies umfasst nicht die Kompensation von THG-Emissionen durch Maßnahmen an anderer Stelle.
- **Fernsteuerbarkeit:** Durch die Fernsteuerbarkeit kann die Ist-Einspeisung einer Stromerzeugungsanlage abgerufen und die Einspeiseleistung stufenweise oder, sobald die technische Möglichkeit besteht, stufenlos ferngesteuert geregelt werden. § 9 EEG 2021 sieht eine Fernsteuerbarkeit für KWK-Anlagen > 25 kW vor, §10b macht weitere Vorgaben für Anlagen, deren Strom direkt vermarktet wird.
- **Flexibilität:** Flexibilität im Stromsystem wird definiert als die Veränderung (bzw. als der Gradient) von Einspeisung oder Entnahme entweder in Reaktion auf ein externes Signal (Preissignal oder Aktivierung) mit dem Ziel, eine Dienstleistung im Energiesystem zu erbringen, oder als Fähigkeit der Stromnetze auf schwankende Stromerzeugungsmengen bzw. -nachfragemengen technisch

³ Pembina Institute (2021).

stabil zu reagieren. Die Fähigkeit einzelner Anlagen(-klassen) die Einspeisung oder Entnahme anzupassen wird auch als Steuerbarkeit bezeichnet.⁴

- **Gas(e):** Eine Substanz ist dann ein Gas, wenn sich ihre Teilchen in großem Abstand voneinander frei bewegen und den verfügbaren Raum kontinuierlich ausfüllen (in Abgrenzung zu den anderen Aggregatzuständen *fest* und *flüssig*). Der Begriff „Gas“ wird in dieser Studie übergreifend für gasförmige Energieträger (in dieser Studie insb. Erdgas, Biogas, Biomethan, Wasserstoff) verwendet, und keinesfalls als Synonym für Erdgas.
- **Klimaneutralität:** Gleichgewicht zwischen den vom Menschen verursachten (anthropogenen) Emissionen von Treibhausgasen und den „negativen Emissionen“ von Senkungsmaßnahmen (z. B. Wälder oder Moore). In der Praxis ist entsprechend davon auszugehen, dass zur Erreichung von Klimaneutralität in 2045 insbesondere die THG-Bruttoemissionen in der Landwirtschaft nicht ganz auf Null absinken werden, sondern die in 2045 noch verbleibenden kaum vermeidbaren THG-Emissionen durch THG-Senken kompensiert werden.
- **KWK:** Kraft-Wärme-Kopplung ist die gleichzeitige Umwandlung von Energie in mechanische oder elektrische Energie und nutzbare Wärme innerhalb eines thermodynamischen oder elektrochemischen Prozesses. Die parallel zur Stromerzeugung produzierte Wärme wird zur Beheizung und Warmwasserbereitung oder für Produktionsprozesse genutzt.⁵ Bei der KWK wird zwischen folgenden Anwendungsfällen unterschieden:
 - **Gebäudeversorgung** (häufig auch bezeichnet als Objekt- oder Quartiersversorgung): Objekt-KWK-Anlagen sind angeschlossen an einzelne oder mehrere Gebäude, wie z. B. Ein- und Mehrfamilienhäuser, Krankenhäuser, Schwimmbäder und Hotels. Die erzeugte Wärme wird in der Regel vor Ort selbst genutzt (Versorgung mit Wärme von bis zu 16 Gebäuden (Wohngebäude oder Nichtwohngebäude) und bis zu 100 Wohneinheiten⁶). Der erzeugte Strom wird in der Regel zum Teil genutzt (z. B. zur Mieterstromversorgung) und zum Teil in ein Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist.
 - **Fernwärme-KWK (auch „leitungsgebundene KWK“):** Strom und Wärme, von einer KWK-Anlage (in der Regel größer als 20 MW_{el} elektrischer Erzeugungsleistung) erzeugt, werden in die öffentliche Versorgung eingespeist.
 - **Industrie-KWK:** KWK-Anlagen, die von einem oder mehreren Industriebetrieben zur Eigenversorgung mit Strom und Wärme genutzt werden. Strom und Wärme werden zu großen Teilen vor Ort selbst genutzt (z. B. Papierfabriken, Chemiekomplexe, Kläranlagen mit Nutzung von Klärgas als Brennstoff, Stahlwerke mit Nutzung von Hüttengasen als Brennstoff).
- **KWK-Fahrweise:** Die Fahrweise von KWK-Anlagen beschreibt die Einsatzlogik der Anlagen, die in der Regel entweder am Strom- oder am Wärmebedarf orientiert ist. Bei der **stromgeführten** (systemdienlichen) Fahrweise orientiert sich der Betrieb der KWK-Anlage an dem Strombedarf im System bzw. der lokalen Verbraucher oder an den Strompreisen. Bei der **wärmegeführten**

⁴ Siehe auch <https://www.next-kraftwerke.de/energie-blog/flexibilitaet-stromsystem>.

⁵ UBA (2021b).

⁶ BMWK (2021).

Fahrweise orientiert sich der Betrieb der KWK-Anlage an dem (lokalen) Wärmebedarf der direkt oder über Fernwärmenetze angeschlossenen Wärmeabnehmer. Unabhängig von der Fahrweise wird in der Regel die gesamte Strom- und Wärmeproduktion genutzt.

- **Lock-in-Effekt:** Beschreibt den Sachverhalt, dass heutige Investitionen in Infrastruktur- und Energieerzeugungseinrichtungen aufgrund deren Kapitalintensivität und langen Lebensdauer erheblichen Einfluss auf den Energieeinsatz in der Zukunft haben werden.
- **Netzdienlichkeit:** Netzdienlich sind einzelne oder mehrere elektrische Anlagen (Erzeuger, Verbraucher oder Speicher), welche dazu beitragen, Netzkosten (u. a. Reduktion von Netzengpässen, Netzausbaubedarf oder optimierte Netzbetriebsführung) zu verringern. Dies kann durch Kenntnis, Plan- oder Steuerbarkeit der Anlagen durch den Netzbetreiber und/oder einen Beitrag zur Vergleichmäßigung der Netzlast erreicht werden. Hierzu ist je nach Netzsituation ein kontextabhängiges Verhalten der Anlagen notwendig.
- **Nutzenergie:** Energie, wie sie vom Endbenutzer direkt benötigt wird. Nutzenergie ist zum Beispiel Wärme zur Beheizung, Licht zur Beleuchtung oder mechanische Antriebsenergie. Nutzenergie entsteht beim Endverbraucher häufig aus der Umwandlung von Endenergie.
- **Primärenergie:** Die Energieart und -menge, die den genutzten natürlichen Quellen entnommen wird. Primärenergie beschreibt zum Beispiel die Energie in Erdöl vor der Umwandlung in Benzin, im Wind vor der Umwandlung in mechanische Energie oder im Sonnenlicht, das auf eine Solarzelle fällt.
- **Power-to-heat:** Power-to-heat beschreibt die Erzeugung von Wärme aus elektrischer Energie. Dies kann zum Beispiel über Elektrokessel oder auch über Wärmepumpen erfolgen.
- **Residuallast der Stromversorgung:** Die Residuallast beschreibt den Teil des Stromverbrauchs in Deutschland, der nach Abzug der Einspeisung von Strom aus (fluktuierenden) erneuerbaren Energien ins Stromnetz übrig ist. Es handelt sich also um den Restbedarf an Strom, der nicht durch die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien abgedeckt werden kann.
- **Residuallast der Wärmeversorgung:** Der Teil des Wärmeverbrauchs der nach Abzug der Wärmezeugung aus nicht regelbaren Energiequellen (z. B. Umweltwärme) übrig ist.
- **Sektorenkopplung:** Die zunehmende Verknüpfung der bisher weitgehend isoliert betrachteten Sektoren Strom, Wärmeversorgung, Verkehr und Industrie. Die Verknüpfung erfolgt u. a. über Schnittstellentechnologien wie Power-to-Gas, oder KWK, oder integrierte Planung der Energieversorgung der Sektoren.
- **Steuerbarkeit:** Steuerbarkeit beschreibt die Fähigkeit einzelner Anlagen(-klassen) die Einspeisung oder Entnahme innerhalb einer definierten Leistungsspanne anzupassen, um zum Beispiel auf Marktsignale (Preise) oder Anweisungen des Netzbetreibers zu reagieren.
- **Systemdienlichkeit:** Ein systemdienlicher Anlageneinsatz trägt zum Erhalt der Systemstabilität im Stromsystem bei. Der Einsatz kann marktgetrieben als Reaktion auf Strompreise oder durch die Stromübertragungsnetzbetreiber im

Zusammenwirken mit den Stromverteilnetzbetreibern initiiert sein. Durch die Übertragungsnetzbetreiber erbrachte Maßnahmen zur Wahrung der Systemverantwortung umfassen dabei unter anderem die Systemdienstleistungen Frequenzhaltung, Spannungshaltung, Betriebsführung und den Versorgungswiederaufbau.

- **Systemverantwortung:** Die Verantwortung der Stromnetzbetreiber (Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber) für die Netz- und Systemsicherheit für den sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb in den Netzgebieten.⁷
- **Treibhausgas (THG):** Gase, die zur globalen Erderwärmung (Treibhauseffekt) beitragen und sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprungs sein können. Das Kyoto-Protokoll nennt sechs Treibhausgase: Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) sowie die fluorierten Treibhausgase (F-Gase): wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), und Schwefelhexafluorid (SF₆). Seit 2015 wird Stickstofftrifluorid (NF₃) zusätzlich einbezogen. In Deutschland entfielen im Jahr 2020 87,1 % der Freisetzung von Treibhausgasen auf CO₂, 6,5 % auf Methan, 4,6 % auf Lachgas und rund 1,7 % auf die F-Gase.⁸ Zur besseren Vergleichbarkeit werden die THG häufig entsprechend ihrem globalen Erwärmungspotenzial in CO₂-Äquivalente (CO₂-eq) umgerechnet. 1g CO₂ entspricht dabei 1g CO₂-Äquivalent, 1g Methan entspricht aufgrund des größeren Erderwärmungspotenzials von Methan z. B. 25g CO₂-Äquivalent. In der Klimadebatte – und auch in dieser Studie – wird aus Vereinfachungsgründen häufig vereinfacht der Begriff CO₂ als Synonym für Treibhausgase verwendet.
- **THG-Emissionen nach dem Quellprinzip:** THG-Emissionen werden dem Sektor angerechnet, in dem sie ursprünglich anfallen.
- **THG-Emissionen nach dem Verursacherprinzip:** THG-Emissionen werden dem Sektor angerechnet, durch welchen sie verursacht werden.
- **Versorgungssicherheit (Strom):** Die Sicherung des Gleichgewichts von Erzeugung und Verbrauch im Stromversorgungssystem im Sinne eines kontinuierlichen Ausgleichs von Angebot und Nachfrage am Strommarkt bzw. im Stromsystem zur Vermeidung von unfreiwilligen Lastunterbrechungen („*Generation Adequacy*“).
- **Versorgungssicherheit (Wärme):** Die stetige bedarfsgerechte Wärmeversorgung, auch unter Berücksichtigung der Saisonalität der Wärmenachfrage und bei Umstieg auf neue Wärmeversorgungslösungen und zugehörige Energieträger.
- **Wärmenetze:** Generell bezieht sich die Unterscheidung zwischen Nah- und Fernwärme auf die räumliche Ausdehnung der Netze. Rechtlich definiert jedoch ist nur der Begriff der Fernwärme.
 - **Fernwärme:** Unter Fernwärme versteht man die Verteilung thermischer Energie in Form von Dampf, heißem Wasser von zentralen oder

⁷ Der deutsche Gesetzgeber ordnet die Systemverantwortung im EnWG den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) und Verteilnetzbetreibern (VNB) zu (§§ 13, 14, 54 Abs. 2 Nr. 5 EnWG2), er gibt aber keine eigene Definition.

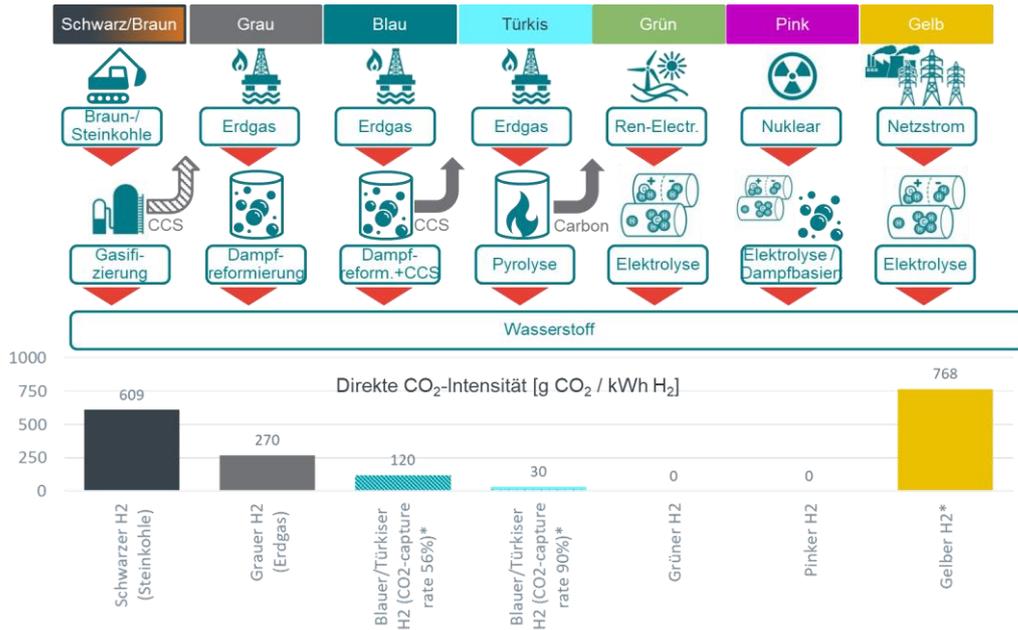
⁸ Siehe <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>.

dezentralen Produktionsquellen über ein Netz an mehrere Gebäude oder Anlagen zur Nutzung von Raum- oder Prozesswärme. Aus rechtlicher Sicht wird mit dieser weiten Definition die klassische Fernwärme, die Nahwärme, sowie „Wärme-Contracting“ eingeschlossen. Außerdem muss ein Energiedienstleister „hohe Investitionen“ vornehmen, damit die Definition der Fernwärme zutrifft (BGH, Urt. V. 21. Dezember 2011, VIII ZR 262/09).

- **Nahwärme:** Der rechtliche Begriff der Fernwärmenetze umfasst auch Nahwärmenetze. Im Allgemeinen bezeichnet Nahwärme kleinere Netze (meist unter 1 km), in welchen üblicherweise mit einer niedrigeren Wassertemperatur gearbeitet wird.
- **Wasserstoff** – Wasserstoff ist ein chemisches Element, das in der Natur vorkommt, zum Beispiel in Kombination mit Sauerstoff-Atomen als Wasser (H_2O), aber auch in Biomasse oder Kohlenwasserstoffen wie Erdöl oder Erdgas. Das chemische Element wird mit H abgekürzt, während die Abkürzung H_2 das Wasserstoffmolekül bezeichnet. Wasserstoff kann direkt als gasförmiger chemischer Energieträger genutzt werden und ist zudem die Basis für fast alle Synthesepfade von klimaneutralen Brenn- und Kraftstoffen (*Power-to-Liquids*). Darüber hinaus kann Wasserstoff in vielen industriellen Prozessen fossile Edukte ersetzen, z. B. Kohle als Reduktionsmittel in der Stahlherstellung.
- Wasserstoff hat als Sekundärenergieträger den Vorteil, prinzipiell aus vielen verschiedenen Energiequellen bereitgestellt werden zu können, die sich jedoch hinsichtlich ihrer Klimawirkungen deutlich unterscheiden. Zur plastischen Unterscheidung hat sich die Benennung von vermeintlichen „Wasserstoff-Farben“ etabliert. Abbildung 1 fasst die wichtigsten Differenzierungen zusammen:
 - „**Schwarzer**“/„**brauner**“ bzw. „**grauer**“ Wasserstoff bezeichnet die aktuell gängigen Erzeugungspfade, die jedoch auf den fossilen Energieträgern Kohle (durch Kohlevergasung; Steinkohle: schwarz; Braunkohle: braun) bzw. Erdgas (durch Dampfreformierung; grau) aufsetzen.
 - Prinzipiell lassen sich diese Pfade durch die Ergänzung von *Carbon Capture and Storage (CCS)* oder *Carbon Capture and Usage (CCU)* Technologien, also durch das Abscheiden des bei der Produktion freiwerdenden CO_2 und dessen dauerhafter Speicherung (CCS) bzw. Weiternutzung (CCU) weitgehend klimaneutral gestalten. In der Praxis wird dieser Weg jedoch nur für aus Erdgas gewonnenem Wasserstoff diskutiert, und dort als „**blauer**“ Wasserstoff bezeichnet. Wird zur Abscheidung auf Methanpyrolyse gesetzt und der abgeschiedene feste Kohlenstoff weitergenutzt (CCU), wird der resultierende Wasserstoff auch als „**türkiser**“ Wasserstoff bezeichnet.
- Zudem kann Wasserstoff mittels Zerlegung von Wasser in die Bestandteile Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) in einer Elektrolyse gewonnen werden, wobei die Wasserstoff-Farben je nach für den Betrieb der Elektrolyse eingesetzter Stromquelle differenziert werden:
 - Kommt ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien (bei Netzbezug sind hierfür entsprechende Nachweiskriterien zu etablieren), wird der Wasserstoff als „**grün**“ bezeichnet.

- Die Gewinnung von „pinkem“ Wasserstoff aus Kernenergie gilt ebenfalls als klimaneutral, jedoch nicht als erneuerbar.
 - Vereinzelt wird mittels des Strommix gewonnener Wasserstoff (z. B. aktuell in der chemischen Industrie im Rahmen der Chlor-Alkali-Elektrolyse) als „gelb“ bezeichnet.
- Dabei sind zukünftig noch weitere Pfade denkbar wie zum Beispiel durch die Nutzung von Pyrolyse-Verfahren in Verbindung mit Abfallstoffen.

Abbildung 1 Übersicht „Farben“ von Wasserstoff



Quelle: Frontier Economics; direkte CO₂-Intensität auf Basis von IEA (2019), Umrechnung auf Basis von Heizwert 33.33kWh/kgH₂.
 * Capture rate von 56 % für Erdgas mit CCS/CCU unterstellt Abscheidung von ausschließlich dem CO₂ des Feedstocks, während 90 % auch eine Abscheidung des Brennstoff-bedingten CO₂ unterstellt.
 ** Globaler Strommix 491g CO₂/kWh_{el}

- **Wasserstoffkompatibilität („Wasserstoff-Readiness“):** Beschreibt die Kompatibilität verschiedener Elemente des Energiesystems mit unterschiedlichen Wasserstoff-Konzentrationen (z. B. Verbrauchsanwendungen wie Kraftwerke, Transport-/Verteilnetze, Speicher). Beimischungsstufen werden vom DVGW in den technischen Regeln G 260 definiert. Ein Element des Energiesystems ist Wasserstoff-ready, wenn es die technischen Anforderungen gemäß DVGW G 260 erfüllt und auf eine spätere Umrüstung für den Einsatz von 100 % Wasserstoff vorbereitet ist. Prozentangaben zur Wasserstoffkompatibilität beziehen sich in der Regel auf das beimischungsfähige Volumen („Volumenprozent“), d. h. bei einer Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas ist der Wasserstoff-Energiegehalt entsprechend kleiner. Die tatsächliche Umrüstung der Elemente sowie deren Betrieb hängen von der Genehmigung für die Brennstoffumstellung und der Verfügbarkeit des Brennstoffs ab.

VORWORT

Die vorliegende Analyse wurde über eine Zeitspanne erstellt, in der sich geopolitische und marktliche Verwerfungen ereignet haben, die zu einer neuen Reflektion gasförmiger Energieträger geführt haben, auf die wir nachfolgend besonders hinweisen. Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass die im Studienverlauf entwickelten Ergebnisse zur zukünftigen Rolle der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auch nach dem kriegerischen Angriff Russlands auf die Ukraine und dessen energiewirtschaftliche Folgen weiterhin Bestand haben. Allerdings bedarf es einer noch schnelleren Transformation von Erdgas auf klimaneutrale und von Russland unabhängige Energieträger wie Biomethan und Wasserstoff, was wir in diesem Bericht bereits reflektiert haben.

Transformation der KWK zur Klimaneutralität bis 2045

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Dazu muss der trotz Energieeffizienzsteigerungen verbleibende Energiebedarf bis spätestens 2045 vollständig von fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Erdgas auf klimaneutrale Energieträger umgestellt werden.

Im Auftrag der Initiative Zukunft Gas e.V haben wir seit September 2021 entsprechend analysiert, welche Rolle die KWK bei der Transformation zu einer klimaneutralen Strom- und Wärmebereitstellung in Deutschland leisten kann, wie eine Transformation der KWK zu Klimaneutralität aussehen kann, und welche Rahmenbedingungen dazu geschaffen werden müssen.

Dabei ist klar, dass die heute noch überwiegend fossil befeuerte KWK bis 2045 im Einklang mit dem deutschen Klimaneutralitätsziel vollständig auf klimaneutrale Energieträger wie Biomethan und Wasserstoff umgestellt werden wird. In der Übergangsphase spielt auch Erdgas – als „Brückenenergieträger“ von den emissionsintensiveren fossilen Energieträgern Kohle und Öl hin zu klimaneutralen Energieträgern – absehbar eine wesentliche Rolle im Energiemix für KWK.

Auswirkungen des Ukrainekrieges auf den Energieträger Erdgas

Im Verlauf der Studiererstellung hat sich die Versorgungslage des Energieträgers Erdgas jedoch gravierend gewandelt: Aufgrund des kriegerischen Angriffs Russlands auf die Ukraine seit dem 24. Februar 2022 ist die bisher bestehende Abhängigkeit von russischen Energieträgern, insbesondere von russischem Erdgas, politisch nicht länger akzeptabel. Diese Abhängigkeit gilt es nun, entsprechend schnellstmöglich zu verringern bzw. zu überwinden. Folgerichtig hat die Europäische Kommission in Ihrem REPowerEU Plan das Ziel formuliert, bis 2027 die Abhängigkeit der Europäischen Union von aus Russland stammenden fossilen Energieträgern auf null zu reduzieren. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Sommer 2024 vollständige Unabhängigkeit von russischem Erdgas (sowie russischem Öl und russischer Kohle bereits zuvor) zu erreichen.

In der Diskussion und den abgeleiteten Politikmaßnahmen sollten jedoch Herkunft (Russland) und Energieträger (hier vor allem: Gas) klar voneinander abgegrenzt werden: Es gilt, die Abhängigkeit von russischen Erdgasimporten schnellstmöglich

zu beenden. Dabei sollten jedoch die Vorteile der Nutzung der leistungsfähigen Gasinfrastruktur mit ihren leistungsstarken Leitungen und großvolumigen Speichern weiter erhalten bleiben. Denn diese werden in einem zunehmend auf Wind- und Sonnenenergie basierendem Energiesystem dringend erforderlich sein.

Entscheidend für eine Beendigung der Abhängigkeit von russischen Erdgasimporten ist daher eine Erschließung zusätzlicher Gasquellen: Einerseits kurz- bis mittelfristig durch eine Diversifizierung der Erdgaseinfuhren, insbesondere durch den schnellstmöglichen Bau von Terminals für den Import von Flüssiggas (LNG). Und andererseits mittel- bis langfristig durch eine massive Erhöhung der Erzeugung und des Imports von erneuerbaren Gasen wie Biomethan und Wasserstoff.

Auswirkungen auf die Rolle von KWK

Für die Rolle von KWK hat der Ukrainekrieg entsprechend auch zentrale Auswirkungen:

- **Langfristig (2045):** Bis 2045 muss und kann KWK unverändert vollständig auf klimaneutrale Energieträger wie Biomethan und Wasserstoff umgestellt werden, um Klimaneutralität zu erreichen. Dies galt bereits unabhängig von den Diskussionen um die Abhängigkeit von russischem Erdgas allein schon aufgrund der Klimaziele.
- **Mittelfristig (2025 bis 2045):** Durch Diversifizierung der Erdgasquellen, insbesondere durch LNG-Importe aus aller Welt, werden Erdgasimporte aus Russland laut Bundesregierung ab spätestens 2025 keine Rolle mehr spielen. Dies ermöglicht weiterhin eine Brückenfunktion des Energieträgers Erdgas bei der KWK, die aufgrund der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung zudem einen Beitrag zur bestmöglichen Nutzung des Energieträgers leisten kann. Die Umstellung von Kohle bzw. Erdgas zu klimaneutralen Energieträgern wie Biomethan und Wasserstoff muss und kann allerdings schneller als bis Kriegsausbruch erwartet vorgenommen werden.
- **Kurzfristig (bis 2024):** In einer Übergangsphase, in der sich zum Beispiel die LNG-Importterminals noch in Planung und Bau befinden, liegt absehbar noch eine gewisse Abhängigkeit von russischem Gas vor. In dieser Phase gilt es, den Gasverbrauch soweit möglich zu reduzieren. Zudem könnte es im Fall eines Embargos russischer Gasimporte (ausgehend von der EU und/oder Deutschland) oder einer Unterbrechung der russischen Gasexporte (ausgehend von Russland) temporär zu einer Gasmangellage kommen. Für diese Übergangsphase sind daher entsprechende Maßnahmen zu entwickeln, und KWK-Anlagen entsprechend ihrer Bedeutung für die Energieversorgung jeweils relativ zu anderen Verbrauchern hinsichtlich einer priorisierten Versorgung einzuordnen. Dabei ist zu beachten, dass KWK-Anlagen in der Regel erforderlich sind, um lokalen Wärmebedarf zu decken, und zudem durch die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung für eine effiziente Nutzung des knappen Energieträgers sorgen.

Im nachfolgenden Bericht fassen wir die Ergebnisse unserer Analyse zur Rolle der KWK zusammen.

ZUSAMMENFASSUNG

Strom- und Wärmeversorgung sind heute für einen erheblichen Teil der Treibhausgasemissionen (THG) in Deutschland verantwortlich. Sie spielen daher eine Schlüsselrolle für das Erreichen der Klimaziele der Bundesregierung. Es stehen eine Reihe potenzieller Technologien und Energieträger für die zukünftige Strom- und Wärmeversorgung mit verschiedenen Vor- und Nachteilen zur Verfügung.

Im Fokus dieser Studie steht die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Die KWK ist ein Funktionsprinzip, bei dem Strom- und Wärme gleichzeitig erzeugt werden. KWK kann auf verschiedenen Brennstoffen wie zum Beispiel Erdgas, Biomasse, Biomechan oder Wasserstoff basieren. KWK ist also keine fossile Technologie. Vielmehr hängt der ökologische Fußabdruck der KWK entscheidend vom eingesetzten Brennstoff ab.

Studienauftrag: Analyse der Rolle von KWK für Klimaneutralität

Im Auftrag der Initiative Zukunft Gas e.V. analysieren wir in dieser Studie, welche Rolle die KWK bei der Transformation zu einer klimaneutralen Strom- und Wärmebereitstellung in Deutschland leisten kann (Kapitel 2 und 3). Zudem skizzieren wir, wie eine Transformation der KWK zu Klimaneutralität aussehen kann (Kapitel 4). Letztlich führen wir aus, welche Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, damit die KWK den skizzierten Beitrag zur Transformation leisten kann (Kapitel 5).

In einem Glossar definieren wir eingangs wesentliche Begrifflichkeiten. Im Anhang stellen wir detaillierte Steckbriefe zu analysierten Wärmeversorgungslösungen bereit.

Die Studie wurde mit Unterstützung einer Begleitgruppe unter Führung von Zukunft Gas e.V. erstellt. In dieser Begleitgruppe waren folgende Unternehmen und Institutionen beteiligt: 2G Energy, Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V., CO-MUNA-metall, EC Power, Eins Energie in Sachsen, Erdgas Südwest, GASAG, Gasversorgung Görlitz, INNIO Jenbacher, Jäckering Grund- und Rohstoffverarbeitung, Kawasaki Gas Turbine Europe, Kraftwerk, Kraftwerke Mainz-Wiesbaden, Rolls-Royce Solutions Augsburg, SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme, SOK-RATHERM, Thüga, Uniper und Wärtsilä. Gemeinsam mit Zukunft Gas e.V. haben diese Unternehmen und Institutionen die Studiererstellung in Form von Projekt-Workshops und Projektberatungen begleitet.

Nachfolgend fassen wir die wesentlichen Ergebnisse der Studie zusammen.

Anforderungen an eine klimaneutrale Energieversorgung sind hoch und vielfältig

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2030 die nationalen THG-Emissionen um 65 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Hierzu müssen also in weniger als 10 Jahren die Emissionen gegenüber heute nahezu halbiert werden. Zum Vergleich: In den 30 Jahren seit 1990 konnten die energiewirtschaftlichen THG-Emissionen trotz klimaschonend wirkender Spezialeffekte infolge der Neustrukturierung der ostdeutschen Energiewirtschaft im Zuge der deutschen Wiedervereinigung um gerade einmal 35 % gesenkt werden.

DAS POTENZIAL DER KWK FÜR DIE TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALEN ENERGIEVERSORGUNG

Bis 2040 sollen die THG-Emissionen gegenüber 1990 dann um 88 % und im Weiteren um 100 % reduziert werden, sodass im Jahr 2045 Klimaneutralität erreicht wird.

Hieraus ergeben sich Anforderungen an die zukünftige Energieversorgung im energiewirtschaftlichen Zieldreieck von Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit. Die folgende Abbildung fasst diese Anforderungen zusammen.

Abbildung 2 Anforderungen an die zukünftige Energieversorgung



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Siehe Kapitel 1 für detailliertere Ausführungen.

KWK-Potenzial in der Strom- und Wärmeversorgung

Die energiebedingten deutschen THG-Emissionen resultieren aus einem Endenergieverbrauch von knapp 2.500 TWh/a. Die Strom- und Wärmeversorgung ist für fast 70 % des Endenergieverbrauchs verantwortlich.⁹ Sie ist zudem noch weitgehend fossil geprägt: 58 % der Stromerzeugung und 87 % der Wärmeerzeugung

⁹ Aktuelle Daten beziehen sich in diesem Bericht soweit nicht anderweitig erwähnt auf das Vor-Corona-Jahr 2019.

basieren auf fossilen Energien. Die Anteile erneuerbarer Energien nehmen zu, sind jedoch vor allem in der Wärmeversorgung noch gering und sind in den vergangenen zehn Jahren nur geringfügig gestiegen.¹⁰

Die Transformation der Strom- und Wärmeversorgung hin zur Klimaneutralität ist daher einer der Schlüssel zur Erreichung der Klimaziele in Deutschland. Die Dringlichkeit ist dabei hoch, da die vollständige Defossilisierung in weniger als 25 Jahren abgeschlossen sein muss.

Die Analysen in dieser Studie zeigen, dass die KWK eine wichtige Rolle zur Erreichung von Klimaneutralität spielen kann und sollte:

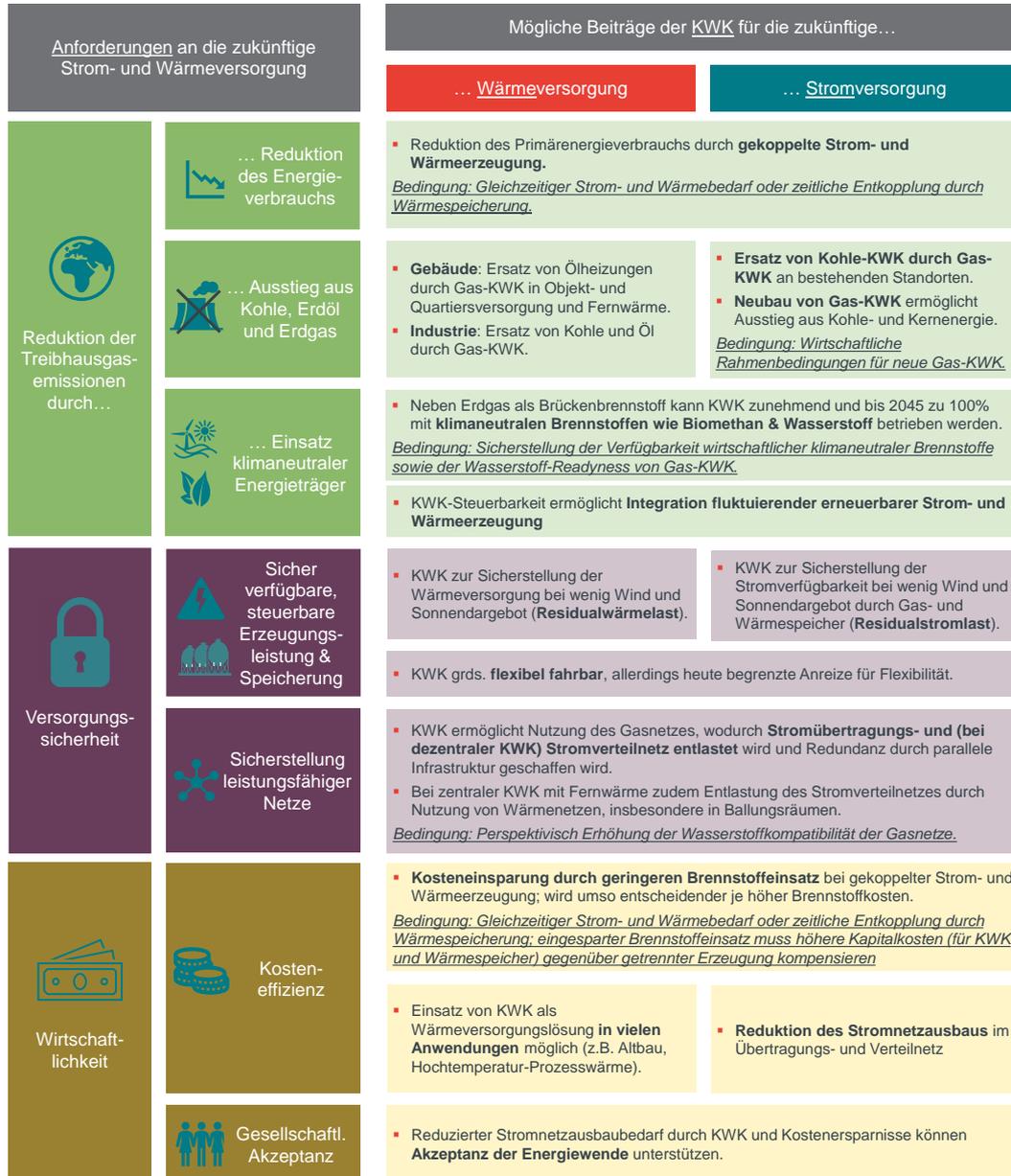
- KWK-Anlagen können, zum Beispiel auf Basis von Biomethan oder grünem Wasserstoff, zu 100 % erneuerbar betrieben werden und damit **zur Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen**. Die KWK ist eine reine Erzeugungstechnologie, die nicht an bestimmte Brennstoffe, wie zum Beispiel Erdgas, gebunden ist. Das Risiko eines „Lock-ins“ fossiler Brennstoffe besteht durch KWK also nicht. Hierfür muss sichergestellt werden, dass KWK-Anlagen schnellstmöglich auf die Nutzung von Wasserstoff eingestellt werden („H2-ready“).
- Die KWK ist zu einer **flexiblen Fahrweise**, zum Beispiel zur Strom- und Wärme-Residuallastdeckung, fähig und trägt somit zur **System- und Versorgungssicherheit** bei. Diese Steuerbarkeit wird im Zuge der ansteigenden Energieerzeugung aus Wind und Sonne, dem Kernenergie- und Kohleausstieg sowie zunehmender Stromnetzengpässe immer wichtiger. Darüber hinaus können KWK-Anlagen in Kombination mit weiteren erneuerbaren Technologien (zum Beispiel Wärmepumpen, Geothermie, PV oder Solarthermie) durch ihre Steuerbarkeit die **Integration von emissionsarmen und erneuerbaren Erzeugungstechnologien** ermöglichen.
- Für die **Transformation der Wärmeerzeugung** ist die zentrale KWK (Fernwärme) und verbrauchsnahe KWK (Objekt-/Quartiersversorgung bzw. Industrierversorgung) ein wesentlicher Bestandteil. Die KWK kann zum Beispiel **Hochtemperatur-Prozesswärme** in der Industrie und die **Wärmeversorgung in teil- und unsaniertem Gebäuden** kosteneffizient und sozial verträglich gewährleisten, kurzfristig noch auf Basis der effizienten Nutzung fossiler Brennstoffe und zukünftig auf Basis klimaneutraler und erneuerbarer Brennstoffe.
- KWK-Anlagen erzeugen heute etwa **22 % der Netto-Stromerzeugung und 17 % der benötigten Wärme** in Deutschland. Auch zukünftig können KWK-Anlagen durch ihre **Steuerbarkeit, effiziente Brennstoffnutzung und vielseitige Einsatzmöglichkeiten** (z.B. in Bezug auf erforderliche Temperaturniveaus) einen wichtigen Beitrag zur Strom- und Wärmeversorgung leisten. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der Pläne der Bundesregierung zum beschleunigten Ausbau der dargebotsabhängigen erneuerbaren Erzeugungstechnologien und der verstärkten Wärmeversorgung durch Wärmenetze. Die KWK ist damit eine wichtige Säule der Energiewende, die an Orten und zu Zeiten Strom und Wärme zur Verfügung stellt, wo dargebotsabhängige Klimatechnologien (Wärmepumpe, PV und Wind) nicht eingesetzt werden können.

¹⁰ BMWi (2021a).

DAS POTENZIAL DER KWK FÜR DIE TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALEN ENERGIEVERSORGUNG

Die folgende Abbildung fasst die wesentlichen Beiträge der KWK zur Erfüllung der zukünftigen Anforderungen an eine klimaneutrale Strom- und Wärmeversorgung zusammen.

Abbildung 3 Mögliche Beiträge der KWK für die zukünftige Strom- und Wärmeversorgung



Quelle: Frontier Economics

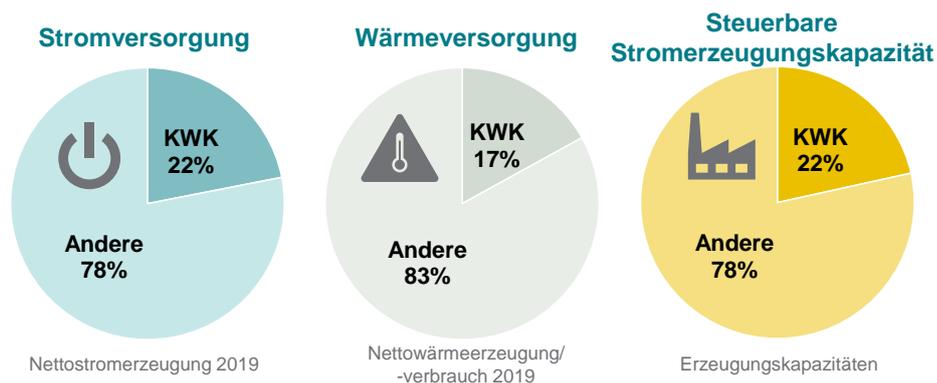
Hinweis: Siehe Kapitel 2 (KWK-Potenzial in der Wärmeversorgung) und 3 (KWK-Potenzial in der Stromversorgung) für detailliertere Ausführungen.

Transformationspfad für eine klimaneutrale KWK

Um die erläuterte Rolle für eine klimaneutrale Strom- und Wärmeversorgung ausfüllen zu können, wird die KWK bis zur angestrebten Klimaneutralität eine Transformation vollziehen müssen:

- **KWK-Kapazitäten als Säule der Strom- und Wärmeversorgung in Deutschland erhalten und ausbauen** – Heute stellen **KWK-Anlagen etwa 22 % der steuerbaren Stromerzeugungskapazität** (Abbildung 4). Während bereits heute KWK-Anlagen für vielfältige Anwendungen über verschiedene Sektoren hinweg zahlreich eingesetzt werden, steigt zukünftig der Bedarf für steuerbare Strom- und Wärmeerzeugungskapazitäten weiter. Der Erhalt der heutigen (nicht kohlebasierten) Leistung aus KWK-Anlagen kann einen Beitrag leisten, diesen Bedarf zu decken. Mittel- und langfristig kann die Leistung von KWK-Anlagen auf Basis von zunehmend erneuerbaren und emissionsarmen Gasen im Einklang mit den Klimaschutzziele auch weiter ausgebaut werden.

Abbildung 4 Beitrag der KWK zur Strom- und Wärmeversorgung in Deutschland und Anteil der KWK an der steuerbaren Stromerzeugungskapazität (2019)



Quelle: Frontier Economics basierend auf UBA (2021c), Fraunhofer ISE (2020b), BMWI (2021a), Bundesnetzagentur (2021a), Bundesnetzagentur (2021b).

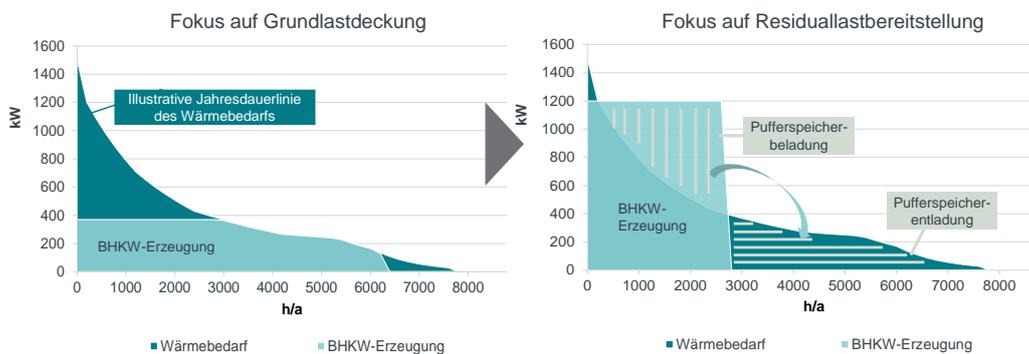
Hinweis: Die Erzeugungsdaten beziehen sich auf 2019, um Einflüsse der Corona-Pandemie (in Daten für 2020 und 2021) nicht abzubilden. Die steuerbare Erzeugungskapazität wurde auf Basis der historischen Stromerzeugung (2019) und einer Auslastung der KWK-Anlagen von 5.000 Vollbenutzungsstunden (Input der Projekt-Partner) geschätzt.

- **Flexibilität von KWK-Anlagen muss zukünftig gezielt erschlossen werden** – KWK-Systeme sind bereits heute eine flexibel steuerbare Erzeugungstechnologie. Die flexibel steuerbare Betriebsweise der KWK-Anlagen muss jedoch zum Teil noch für die Strom- und Wärmesysteme erschlossen werden.¹¹ Dafür werden z. B. **angepasste Wärmeversorgungs-Konzepte** (inkl. Wärmespeicher bzw. mit Erweiterung der Wärmespeichervolumina), eine angepasste **Dimensionierung** (höhere Spitzenleistung) und eine angepasste **Fahrweise** der KWK-Anlagen benötigt. Um die Steuerbarkeit für die Strom- und Wärmesysteme zu erschließen, können bestehende KWK-Anlagen bis 2025 umgerüstet

¹¹ Viele bestehende KWK-Anlagen in Deutschland werden bislang wärmegeführt betrieben. Dieses Konzept stammt jedoch aus der fossil-dominierten Energieversorgung, bei der durch eine wärmegeführte Fahrweise der maximale Umwelt- und Klimanutzen erreicht werden konnte. Im Zuge steigender Anteile dargebotsabhängiger Energieerzeugung aus Wind und Sonne bedarf es einer Anpassung der KWK-Anlagenauslegung und -betriebsweise, insbesondere um flexibel auf die jeweilige Situation im Stromsystem reagieren zu können. Hierfür müssen die entsprechenden politischen Rahmenbedingungen geschaffen werden.

und in ihrer Betriebslogik angepasst werden, wenn angemessene Anreize hierfür implementiert werden. Neue KWK-Systeme sollen für einen Betrieb konzeptioniert sein, der den Strom- und Wärmesystemen einen hohen Grad an Steuerbarkeit und damit Versorgungssicherheit zur Verfügung stellt. KWK-Anlagen dienen somit zunehmend als Back-up für die dargebotsabhängige Stromerzeugung aus Wind und Sonne. Diese Betriebsweise impliziert, dass die KWK-Anlage **in weniger Stunden im Jahr in Betrieb** ist als bei einem Fokus auf Grundlastdeckung. Die Summe der jährlichen Wärmeerzeugung und somit der jährliche Brennstoffbedarf werden jedoch dadurch nicht grundlegend verändert (siehe exemplarisch Abbildung 5).

Abbildung 5 Illustrative Dimensionierung und Fahrweise einer systemdienlichen KWK-Anlagenkonzeption (Jahresbetrachtung)

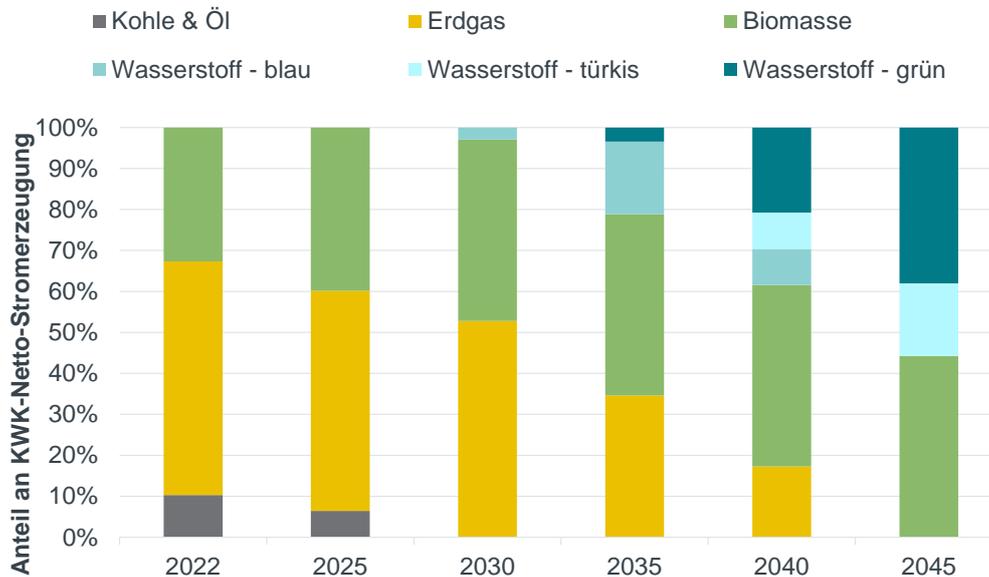


Quelle: Frontier Economics

- **Die KWK kann mit schrittweiser Umstellung effektiv THG-Emissionen reduzieren** – KWK beschreibt ein Funktionsprinzip, das auf unterschiedlichen Brennstoffen basieren kann. Heute werden knapp 50 % der KWK-Erzeugung mit Erdgas, etwa 25 % mit Biomasse (inkl. Folgeprodukte Biogas und Biometan) und noch etwa 20 % mit den Brennstoffen Steinkohle, Braunkohle und Öl erzeugt. Zukünftig muss und kann die Brennstoffnutzung transformiert werden:
 - **Ablösung der Kohle-KWK:** Bis 2030 kann die Kohle-gefeuerte KWK durch Erdgas- und Biomethan-gefeuerte KWK ersetzt werden. Zudem ist eine zeitnahe Umrüstung aller Gas-KWK zu gewährleisten, um zügig bzw. im weiteren Zeitverlauf einen Betrieb mit 100 % Wasserstoff bzw. Biomethan zu ermöglichen.
 - **Ablösung der Erdgas-KWK:** Spätestens ab 2030 sollte ein zunehmender Einsatz von Wasserstoff in der KWK zusätzlich zu Biomethan bei rückläufigem Erdgaseinsatz stattfinden. Bis spätestens 2045 ist ein vollständiger Ausstieg aus Erdgas-KWK vorzusehen.

Abbildung 6 zeigt eine potenzielle Veränderung des Energieträgersplits unter Berücksichtigung der oben genannten Eckpunkte.

Abbildung 6 Potenzielle Entwicklung des Energieträger-Mix der KWK-Erzeugung



Quelle: Frontier Economics

Handlungsempfehlungen

Um die Potenziale der KWK für eine klimaneutrale, sichere und wirtschaftliche Strom- und Wärmeversorgung zu realisieren und die zuvor skizzierte Transformation der KWK erfolgreich umzusetzen, müssen die Rahmenbedingungen geschaffen werden:

- Erhalt und Zubau von KWK:** Zunächst gilt es, die vorhandenen KWK-Kapazitäten zu erhalten und zielgerichteten Neubau zu ermöglichen. Hierzu bedarf es neben einem stabilen Rechtsrahmen zusätzlicher Anreize für Investitionen in KWK-Anlagen, Wärmespeicher und Wärmenetze, den Einsatz erneuerbarer und dekarbonisierter Gase und einer Beschleunigung von Genehmigungsverfahren.
- Flexibilisierung von KWK:** Zudem müssen Anreize verstärkt werden, bestehende wie neu zu errichtende KWK-Anlagen soweit möglich stromsystemdienlich auszuliegen und zu betreiben. Dazu gilt es die KWKG-Förderung zu flexibilisieren, Ausschreibungen für innovative KWK (iKWK) auszuweiten und zu vereinfachen, und bei der anstehenden Reform des Systems aus Netzentgelten, Abgaben, Umlagen und Steuern der Stromnetzentlastung von KWK-Anlagen Rechnung zu tragen.
- Defossilisierung von KWK:** Ein weiterer essenzieller Baustein sind Rahmenbedingungen für eine schnelle Defossilisierung der KWK. Hierzu zählen Maßnahmen um einen schnellen Ersatz von Kohle-KWK durch H₂-ready Gas-KWK zu forcieren, wie beispielsweise eine Anpassung des Kohleersatzbonus an den beschleunigten Kohleausstieg und Verfeinerungen der Kriterien für Gas-KWK in der EU-Taxonomie. Um mittel- und langfristig einen Umstieg von KWK auf

emissionsarme bzw. klimaneutrale Brennstoffe zu ermöglichen, muss die Verfügbarkeit ausreichender und wirtschaftlicher Biomethan- und Wasserstoffvolumen für die KWK-Erzeugung sichergestellt werden. Hierzu bedarf es neben dem Fortbestand der Förderung von Biomethan in der KWK-Erzeugung weiterer Instrumente zur Anschubfinanzierung für den Markthochlauf von Biomethan und Wasserstoff, Anreizen und Standardlösungen für die Gewährleistung von Wasserstoff-Readiness von KWK-Anlagen sowie Rahmenbedingungen für die Ertüchtigung der Gasinfrastruktur für Wasserstoff.

1 ANFORDERUNGEN AN EINE KLIMANEUTRALE ENERGIEVERSORGUNG

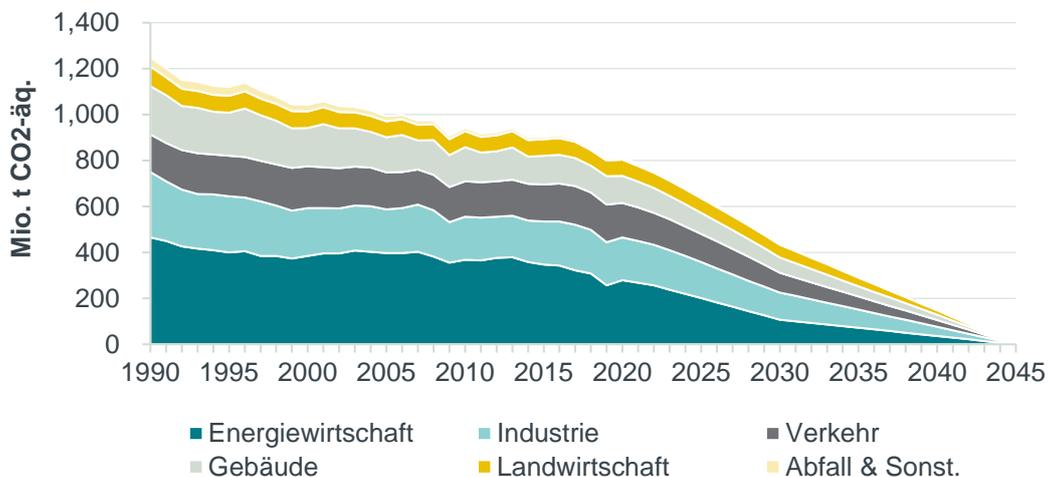
Um das im internationalen Klimaabkommen von Paris im Jahr 2015 vereinbarte Ziel einer Erderwärmung von deutlich unter 2 Grad Celsius (bzw. „möglichst“ um weniger als 1,5 Grad Celsius) einzuhalten, müssen die Emissionsmengen globaler Treibhausgase (THG) deutlich gesenkt werden. Insbesondere in der Strom- und der Wärmeversorgung sind erhebliche THG-Reduktionen erforderlich (Kapitel 1.1).

Hieraus ergeben sich Anforderungen an die zukünftige Energieversorgung im energiewirtschaftlichen Zieldreieck von Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit (Kapitel 1.2).

1.1 Ziel von Klimaneutralität bis 2045 und ambitionierte Zwischenziele auf dem Weg dahin

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2030 die nationalen THG-Emissionen um 65 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Bis 2040 soll dieser Wert auf 88 % und im weiteren Zeitverlauf auf 100 % steigen, sodass im Jahr 2045 Klimaneutralität erreicht wird (Abbildung 7).

Abbildung 7 Historische THG-Emissionen und Sektorziele gemäß Klimaschutzgesetz (KSG)



Quelle: Frontier Economics basierend auf: 1990-2020 aus UBA (2021a) Trendtabellen THG nach Sektoren, 2021 bis 2030 auf Basis des Klimaschutzgesetzes (KSG) gemäß letzter Änderung von August 2021, 2031 bis 2045 Fortschreibung gemäß allgemeiner THG-Ziele aus Klimaschutzgesetz, Annahme gleichbleibender Verteilung der Emissionen zwischen Sektoren.

Dies bedeutet, dass Deutschland die THG-Emissionen bis 2030 um knapp 46 % gegenüber dem Niveau im Jahr 2020 reduzieren muss. Innerhalb von 10 Jahren müssen die Emissionen also fast halbiert werden. Zum Vergleich: In den 30 Jahren zwischen 1990 und 2020 wurde eine Emissionsreduktion um gerade einmal 35 % erreicht. Während also zwischen 1990 und 2020 eine durchschnittliche Reduktion der Emissionen von knapp 1,2 % erreicht wurde, muss zwischen 2020 und 2030 eine durchschnittliche Emissionsreduktion von 4,6 % erreicht werden.

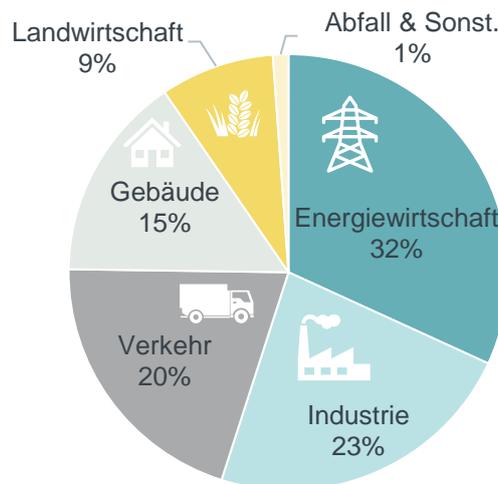


Innerhalb von 10 Jahren müssen die THG-Emissionen in Deutschland nahezu halbiert werden.

Vier Sektoren verursachen 90 % der THG-Emissionen

Die THG-Emissionen betragen 2019 in Deutschland etwa 810 Mio. t CO₂-eq. Der weitaus größte Teil der Treibhausgasemissionen (90 %) stammt, auf Grundlage des Quellprinzips, aus den Sektoren Energiewirtschaft (32 % der THG-Emissionen), Industrie (23 %), Verkehr (20 %) und Gebäude (15 %).

Abbildung 8 THG-Emissionen 2019 in Deutschland nach Sektoren



Quelle: Frontier Economics auf Basis von UBA (2021a).

Hinweis: Dargestellt sind Brutto-THG-Emissionen nach Quellprinzip.

Strom und Wärme für 69 % der Endenergienachfrage verantwortlich

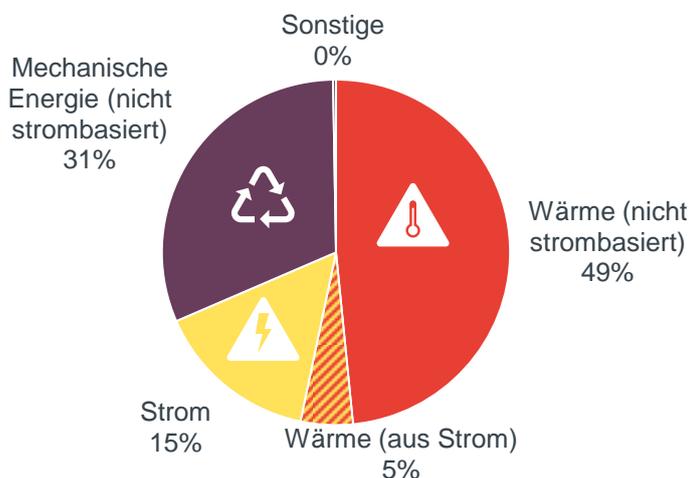
Die deutschen THG-Emissionen resultieren aus einem Endenergieverbrauch von 2.495 TWh in Deutschland (2019). Die Endenergie wird über alle Sektoren hinweg vornehmlich für die Erzeugung von Wärme und Strom und als mechanische Energie eingesetzt. Von den 2.495 TWh/a Endenergie werden:

- 49 % für die Wärmeerzeugung, vor allem in den Sektoren Gebäude- und Industrie, benötigt; und
- 20 % für die Stromerzeugung, vor allem für elektrische Anwendungen in den Sektoren Gebäude, Industrie und zunehmend Verkehr, benötigt (5 % des Stroms werden für die Wärmeerzeugung eingesetzt); und

- 31 % für den Einsatz als mechanische Energie benötigt.

Die Strom- und Wärmeversorgung sind somit gemeinsam für 69 % der gesamten Endenergienachfrage in Deutschland (2019) verantwortlich (Abbildung 9).

Abbildung 9 Aufteilung des Endenergieverbrauchs in Deutschland 2019 (Gesamtverbrauch: 2.495 TWh)



Quelle: Frontier Economics auf Basis der Daten in BMWi (2021a).

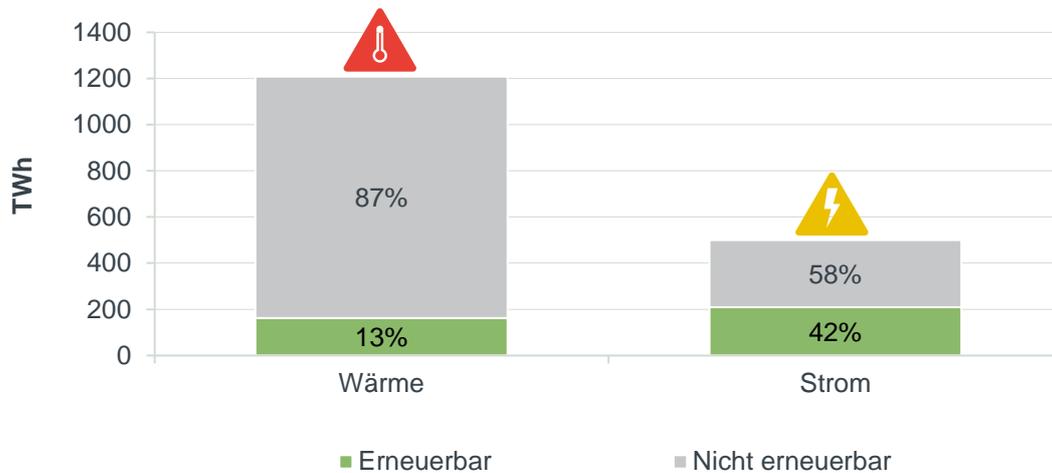
Hinweis: Wärme umfasst Raumwärme, Warmwasser & Prozesswärme.

Strom- und Wärme zum Großteil fossil erzeugt

Die Strom- und Wärmeversorgung sind heute noch weitgehend fossil geprägt, und es müssen noch erhebliche Anteile der Strom- und Wärmeerzeugung auf Erneuerbare Energien umgestellt werden:

- Im Jahr 2019 wurden **58 % des verbrauchten Stroms durch fossile Energien** und 42 % des Stroms durch Erneuerbare Energien bereitgestellt.
- Die **Bereitstellung von Wärme erfolgt bisher zu 87 % auf Basis von fossilen Energien** (ohne Berücksichtigung des Stromanteils) und zu 13 % auf Basis von erneuerbaren Energien (2019).

Abbildung 10 Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für
Strom und Wärme in Deutschland 2019



Quelle: Frontier Economics auf Basis der Daten von BMWi (2021a) und BMWi (2021c).

Hinweis: Der zur Wärmeerzeugung eingesetzte Strom wird hier unter „Strom“ erfasst.

Die Defossilisierung der Bereitstellung von Strom und Wärme ist mit einem Anteil von fast 70 % des Endenergiebedarfs in Deutschland ein wesentlicher Teil eines erfolgreichen Klimaschutzes. Nur wenn es gelingt, die Emissionen dieser beiden Sektoren maßgeblich zu reduzieren, besteht eine Chance zur Erreichung der ambitionierten Klimaschutzziele. In den Kapiteln 2.2 und 3.1 gehen wir daher jeweils auf die besonderen Anforderungen zur Zielerreichung in diesen Sektoren ein.

1.2 Resultierende Anforderungen an eine klimaneutrale Energieversorgung

Aus dem Ziel der Klimaneutralität bis 2045 ergeben sich Anforderungen an die zukünftige Energieversorgung im energiewirtschaftlichen Zieldreieck von Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit (siehe Abbildung 2 für eine Zusammenfassung).

Klimaschutz

Die Reduktion von THG-Emissionen wird auf verschiedenen Säulen basieren müssen:

- **Verringerung des Energiebedarfs** – Ein wesentlicher Schritt zur Erreichung von Klimaneutralität ist die Reduktion des Primärenergieverbrauchs. Dazu ist eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz erforderlich:
 - Dies kann **angebotsseitig** durch den Einsatz von Energieerzeugungstechnologien mit möglichst hohen Wirkungsgraden erreicht werden.
 - **Nachfrageseitig** tragen Maßnahmen zur Vermeidung und Reduktion des Nutzenergiebedarfs (z. B. energetische Sanierungen in Gebäuden) und Endanwendungen mit hohen Wirkungsgraden zur Verringerung des Endenergiebedarfs (z. B. KWK, elektrische Wärmepumpen in Gebäuden und

Batterie- und/oder Brennstoffzellen-basierte Elektromobilität) zur Erhöhung der Energieeffizienz bei.

Energieeffizienz ist allerdings kein Selbstzweck, und sollte keinesfalls als singuläres Bewertungskriterium für die Vorteilhaftigkeit von Technologien verwendet werden. Es gibt zahlreiche weitere relevante Kriterien, wie zum Beispiel die Auswirkungen einer Technologie auf das Energiesystem entlang der gesamten Wertschöpfungskette oder die Verfügbarkeit des Primärenergieträgers.

- **Ausstieg aus der Verbrennung fossiler Energieträger und Einsatz klimaneutraler Energieträger** – Verbleibender Energiebedarf muss zunehmend und letztlich vollständig von fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Erdgas auf klimaneutrale Energieträger umgestellt werden. Entsprechend bedarf es eines erheblichen Ausbaus der erneuerbaren Energien. Besonders groß sind die heimischen und globalen Potenziale für Wind an Land und auf See sowie Solarenergie, welche insbesondere zur Stromgewinnung genutzt werden können:
 - So soll gemäß „Osterpaket“ der Bundesregierung die elektrische Leistung von Photovoltaik bereits bis 2030 auf 215 GW gesteigert und somit gegenüber heute mehr als verdreifacht werden.
 - Für Wind auf See zielt das BMWK auf einen Ausbau von 30 GW bis 2030 und 70 GW bis 2045 ab.
 - Die Kapazität von Windanlagen an Land soll gemäß BMWK bis 2030 auf 115 GW gesteigert werden, was – unter Berücksichtigung des Rückbaus älterer Anlagen – einer Verdopplung der derzeitigen Leistung entspricht.¹²

Der erneuerbar erzeugte Strom kann entweder unmittelbar in elektrischen Anwendungen genutzt oder in weiteren Prozessschritten zu Wasserstoff oder Folgeprodukten wie e-Fuels weiterverarbeitet werden.

Eine weitere wichtige Quelle erneuerbarer Energie ist Biomasse inkl. deren Abfallprodukte, welche unmittelbar zur Strom- und Wärmeerzeugung verwendet oder zu Biogas bzw. Biomethan weiterverarbeitet werden kann. Hinzu kommen nicht-erneuerbare emissionsarme Energieträger, welche aus fossilen Quellen wie Erdgas gewonnen werden, bei denen jedoch der Kohlenstoff größtenteils abgespalten und gespeichert oder genutzt wird (CCS bzw. CCU).¹³

Versorgungssicherheit

Mit fast 70 % der Endenergienutzung stellt die Strom- und Wärmeversorgung das Rückgrat vieler Teile der deutschen Volkswirtschaft dar. Der notwendige Umbau muss daher stets unter Wahrung der Versorgungssicherheit erfolgen:

- **Sicherstellung flexibler und zuverlässiger Energieerzeugungsleistung, flexibler Nachfrage und Speicherung** – Eine wesentliche Anforderung für eine klimaneutrale Energieversorgung wird darin bestehen, den Energiebedarf trotz zunehmend vom Wind- und Sonnendargebot abhängiger Energieerzeugung jederzeit zuverlässig decken zu können. Dies gilt vor allem in Phasen hohen Verbrauchs und geringer Wind- und Sonnenverfügbarkeit. Hierzu bedarf

¹² BMWK (2022b).

¹³ Siehe das eingehende Glossar für weitergehende Beschreibungen verschiedener Energieträger.

es ausreichend dimensionierter, zuverlässig verfügbarer Strom- und Wärmeerzeugungsleistungen, die zudem flexibel in Reaktion auf das Wind- und Sonnendargebot steuerbar sind, sowie einer Flexibilisierung des Verbrauchs.

Zudem ergibt sich in einem überwiegend aus dargebotsabhängigen erneuerbaren Energiequellen versorgten Energiesystem ein **erheblicher Bedarf, Energie zwischenzuspeichern**:

- Dies liegt zum einen – wie bisher – an der Notwendigkeit, **nachfrageseitig** (gerade im Wärmesektor) ein stark temperaturabhängiges und damit saisonales Nachfrageprofil bedienen zu müssen.
- Zusätzlich ergibt sich beim Rückgriff auf dargebotsabhängige Energiequellen wie Wind- und Solarenergie die Notwendigkeit einer Pufferung von **angebotsseitigen** Unterbrechungen (z. B. für regelmäßig auftretende Situationen mit wenig Wind und wenig Sonne).
- **Sicherstellung leistungsfähiger Netze** – Die Stromerzeugung wird sich weiter von steuerbaren, meist lastnahen Großkraftwerken hin zu dargebotsabhängigen und oft lastfernen Windparks sowie dezentralen Solaranlagen verlagern. Eine zunehmende Elektrifizierung von Verbrauchsanwendungen wie Heizungen und Fahrzeugen verändert zudem die Energieverbrauchsstruktur und erhöht trotz Steigerung der Energieeffizienz den Stromverbrauch und die Höhe der vorzuhaltenden gesicherten, steuerbaren Stromerzeugungsleistung. So geht beispielsweise die Bundesregierung von einem Bruttostrombedarf von 680-750 TWh/a im Jahr 2030 aus,¹⁴ im Vergleich zu 567 TWh in 2019 oder 562 TWh in 2021.¹⁵

Entsprechend wird es eines erheblichen Ausbaus der Stromnetze bedürfen, sowohl im Übertragungsnetz als auch in den Verteilnetzen.¹⁶ Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass die zur Erhaltung der Systemsicherheit des Stromnetzes erforderlichen Dienstleistungen wie Frequenzhaltung, Blindleistung oder Versorgungswiederaufbau trotz Kohle- und Kernenergieausstieg verfügbar sind.

Wirtschaftlichkeit & Akzeptanz

Der Umbau der Strom- und Wärmeversorgung zu einer klimaneutralen und sicheren Versorgung muss nicht zuletzt auch unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz erfolgen:

- **Kosteneffizienz** – Eine Umstellung der Strom- und Wärmeversorgung von fossilen auf emissionsarme Energieträger ist mit Kosten verbunden. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit und Bezahlbarkeit müssen diese Kosten möglichst gering gehalten werden. Hierbei sind allerdings nicht allein die Kosten der Energiegewinnung zu betrachten, sondern die **Kosten entlang der gesamten**

¹⁴ Vgl. SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021), S. 44.

¹⁵ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/256942/umfrage/bruttostromverbrauch-in-deutschland/>.

¹⁶ Die Übertragungsnetzbetreiber schätzen die Investitionskosten allein bis 2035 auf 75 bis 79 Mrd. € (Quelle: Übertragungsnetzbetreiber (2021)). Eine Gruppe von 60 Verteilnetzbetreibern schätzen den Ausbaubedarf für ihre Netze auf 16 Mrd. € bis 2030 (Quelle: Bundesnetzagentur (2021d)).

Wertschöpfungskette, also von der Erzeugung, über den Transport, die Speicherung und der Verteilung bis zur Endanwendung (Systemkosten).

- **Gesellschaftliche Akzeptanz** – Voraussetzung für eine klimaneutrale Energieversorgung ist, dass die Maßnahmen von der Gesellschaft mitgetragen werden. Hierbei spielen neben der Bezahlbarkeit auch eine Reihe nicht-monetärer Aspekte eine entscheidende Rolle, wobei sich auch monetäre und nicht-monetäre Aspekte vermengen können:
 - Ein konkretes Beispiel hierfür sind lokale Widerstände gegen den Stromnetzausbau. Diese sprechen dafür, so weit möglich und sinnvoll auf **vorhandene Infrastrukturen** zurückzugreifen sowie die Gesamt-Stromnetzausbaubedarfe, insbesondere auf Höchst- und Hochspannungsebene, zu minimieren.
 - Analog sind Vorbehalte gegen den Bau von Windrädern in der Nähe von Wohngebieten ein Argument dafür, auch zukünftig wesentliche Anteile der **Energie zu importieren**. Dann allerdings erneuerbare und/oder emissionsarme Energieträger, welche aus einem möglichst diversifizierten Portfolio von Regionen mit entsprechend guten Rahmenbedingungen (Sonne, Wind, Platz, politische Verlässlichkeit etc.) verfügen.
 - Ebenfalls müssen – gerade aufgrund der hohen Dringlichkeit von THG-Emissionsminderungen – Defossilisierungsoptionen auch für **vorhandene Endanwendungen** (z. B. Bestandsgebäude) entwickelt und angeboten werden. Im Heizungsbereich kann dies zum Beispiel durch eine klimaneutrale Fernwärme oder defossilisierte Gase (Biomethan, Wasserstoff) ermöglicht werden.

Abbildung 2 fasst die Anforderungen an eine klimaneutrale Energieversorgung zusammen. Vor dem Hintergrund dieser Anforderungen werden in den folgenden Kapiteln die besonderen Potenziale der KWK in der Wärmeversorgung (Kapitel 2) und in der Stromversorgung (Kapitel 3) analysiert.

Abbildung 11 Anforderungen an die zukünftige Energieversorgung

 Reduktion der Treibhausgasemissionen durch...	 ... Reduktion des Energieverbrauchs	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion des Primärenergieverbrauchs durch Steigerung der Energieeffizienz: <ul style="list-style-type: none"> Angebotsseitig durch den Einsatz von Energieerzeugungstechnologien mit möglichst hohen Wirkungsgraden und/oder Nachfrageseitig durch Reduktion des Nutzenergiebedarfs (z.B. energetische Sanierungen in Gebäuden) oder des Endenergiebedarfs durch Endanwendungen mit hohen Wirkungsgraden.
	 ... Ausstieg aus Kohle, Erdöl und Erdgas	<ul style="list-style-type: none"> Zunehmende und bis 2045 vollständige Abkehr von der Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Braun- und Steinkohle, Erdöl und Erdgas (zumindest ohne Abscheidung und Speicherung oder Nutzung des CO₂).
	 ... Einsatz klimaneutraler Energieträger	<ul style="list-style-type: none"> Erheblicher Ausbau erneuerbarer und klimaneutraler Energien, insbesondere aus Wind- und Solarenergie sowie Biomasse. Unmittelbare Nutzung erneuerbar erzeugten Stroms in elektrischen Anwendungen oder Weiterverarbeitung zu Wasserstoff und Folgeprodukten wie e-fuels.
 Versorgungssicherheit	 Sicher verfügbare, steuerbare Erzeugungslleistung & Speicherung	<ul style="list-style-type: none"> Jederzeit zuverlässige Deckung des Energiebedarfs, auch in Phasen hohen Verbrauchs und geringer Wind- und Sonnenverfügbarkeit. Hierzu sicher verfügbare Erzeugungsleistung erforderlich, also verfügbare Leistung (Kraftwerk) in Kombination mit verfügbarem Energieträger. Zudem Bedarf flexibel steuerbarer Strom- und Wärmeerzeugungstechnologien, Möglichkeiten der Energiespeicherung und Flexibilisierung des Verbrauchs.
	 Sicherstellung leistungsfähiger Netze	<ul style="list-style-type: none"> Anpassung der Transport- und Verteilnetze an die zunehmend dargebotsabhängige Energieerzeugung in lastfernen Windparks und dezentralen Solaranlagen sowie die durch zunehmende Elektrifizierung veränderte Energieverbrauchsstruktur. Erhaltung der Systemsicherheit des Stromnetzes durch kontinuierliche Erbringung von Systemdienstleistungen wie Frequenzhaltung, Blindleistung oder Schwarzstartfähigkeit trotz Kohle- und Kernenergieausstiegs.
 Wirtschaftlichkeit	 Kosteneffizienz	<ul style="list-style-type: none"> Klimaneutrale Energieversorgung sollte zu geringstmöglichen Systemkosten erreicht werden. Kosten sind entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu betrachten, also von Erzeugung über Transport, Speicherung, Verteilung bis zur Endanwendung.
	 Gesellschaftl. Akzeptanz	<ul style="list-style-type: none"> Voraussetzung für eine klimaneutrale Energieversorgung ist die gesellschaftliche Akzeptanz der Maßnahmen. Daher sind die vielfältigen Präferenzen und Vorbehalte der Menschen vor Ort zu berücksichtigen (z.B. bei Netzausbau oder Heizungswahl) und Bezahlbarkeit sicherzustellen.

Quelle: Frontier Economics

2 KWK-POTENZIAL IN DER WÄRMEVERSORGUNG

Der Wärmeversorgung kommt eine Schlüsselrolle für die Transformation des Energiesystems zur Klimaneutralität zu. In diesem Kapitel arbeiten wir den Beitrag von KWK für die Erreichung der Klimaziele in der Wärmeversorgung heraus.

Hierfür fassen wir einleitend den Beitrag von KWK für Klimaneutralität in der Wärmeversorgung zusammen (Kapitel 2.1).

Anschließend...

- ...stellen wir die spezifischen **Anforderungen an eine Transformation zur Klimaneutralität** in der Wärmeversorgung dar (Kapitel 2.2);
- ...erörtern wir im Rahmen einer vergleichenden Analyse die wesentlichen **Technologien zur klimaneutralen Wärmeversorgung** mit Blick auf ihre technischen und wirtschaftlichen Merkmale (Kapitel 2.2);
- ...erläutern wir die Anforderungen an die zukünftige Betriebsweise von **KWK-Anlagen** in einem zunehmend durch Wind- und Sonnenenergie geprägten System (Kapitel 2.4).

2.1 Zusammenfassung

Die Wärmeversorgung in Deutschland innerhalb eines Zeitraums von 23 Jahren klimaneutral zu gestalten ist eine Mammutaufgabe: Schon bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen gemäß Klimaschutzgesetz um 37 % (Industrie) bzw. 43 % (Gebäudesektor) gegenüber 2020 reduziert werden. Der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung soll laut Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung von etwa 13 % (2019) auf 50 % (2030) erhöht werden. Bis 2045 muss dann vollständig auf klimaneutrale Energieträger umgestellt werden.

Die KWK kann hierbei eine entscheidende Rolle spielen. KWK ist eine vielseitige Technologie mit unterschiedlichen Anwendungsmöglichkeiten, sowohl zentral für Industrie und Fernwärme als auch dezentral zur Objekt- und Quartiersversorgung. Bereits heute beträgt die Netto-Wärmeerzeugung mit KWK 225 TWh/a (2019) und deckt damit etwa 17 % des Wärmebedarfs.

Nachfolgend fassen wir die Schlussfolgerungen zur Rolle der KWK für eine klimaneutrale Wärmeversorgung zusammen. Dabei spiegeln wir jeweils, inwiefern KWK die in Kapitel 1 identifizierten Anforderungen im Zieldreieck von Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit adressieren kann.

KWK kann wesentlich zum [Klimaschutz](#) beitragen

Die Nutzung von KWK-Anlagen kann wesentlich zum Klimaschutz beitragen:

- **Reduktion des Primärenergieverbrauchs** – Bei der reinen Stromerzeugung „auf der grünen Wiese“ wird die „Abwärme“ der Umwelt (v. a. Flüssen) zugeführt. Bei KWK-Erzeugung hingegen wird der eingesetzte Brennstoff durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme effizient genutzt. Die

„Abwärme“ wird also Wärmenetzen, der Industrie oder der Gebäudeheizung zugeführt und verringert den Bedarf nach Brennstoffen für die Wärmeerzeugung. Dadurch sinkt der Primärenergieverbrauch gegenüber einer getrennten Strom- und Wärmeerzeugung um bis zu 30 %.¹⁷

- **Ausstieg aus fossilen Energieträgern:** KWK kann dazu beitragen, öl- und kohlebasierte Wärmeerzeugung sowohl in Gebäuden als auch in der Industrie bereits kurzfristig zu ersetzen. Zudem unterstützt KWK die Nutzung und den Ausbau von Wärmenetzen, welche vor allem in Ballungsräumen ein wesentliches Element auf dem Weg zur klimaneutralen Wärmeversorgung sein werden.
- **Einsatz klimaneutraler Energieträger:** KWK kann neben Erdgas als Brückenbrennstoff zunehmend mit Biomethan und Wasserstoff betrieben werden. Die Biomethan-Potenziale sind erheblich und die technischen Voraussetzungen für eine Biomethan-Nutzung sind bereits vorhanden. Diesbezüglich müssen allerdings die entsprechenden politischen Rahmenbedingungen gelegt werden. Um Wasserstoff in KWK-Anlagen nutzen zu können, müssen und können KWK-Anlagen zeitnah für den Betrieb mit 100 % Wasserstoff ausgerichtet werden. Zudem müssen die Rahmenbedingungen für ausreichende, wirtschaftliche und emissionsarme Wasserstoffmengen geschaffen werden (siehe auch Kapitel 5).

KWK ist wesentlich für den Erhalt der Versorgungssicherheit

Neben dem Beitrag zum Klimaschutz ist KWK wichtig für die Sicherheit der Wärmeversorgung:

- **Sicherstellung flexibler und zuverlässiger Erzeugung und Speicherung** – Der Energiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme ist von erheblicher Saisonalität geprägt. Die bereitstellende Infrastruktur muss zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit zudem auf Extremsituationen in kalten Wintern ausgelegt sein. Die Gasinfrastruktur mit ihren enormen Gasspeicherkapazitäten (etwa 260 TWh) und ihrer enormen Ausspeicherleistung (zum Beispiel im Februar 2018 bis zu 2.700 GWh pro Tag)¹⁸ ist seit jeher auf die Bedienung des Wärmebedarfs ausgelegt. Gasbasierte KWK ist daher in der Lage jederzeit die Erzeugung an den Wärmebedarf anzupassen.

Zukünftig wird die Wärmeerzeugung auch auf wachsenden Anteilen aus Erneuerbaren Energien inkl. Umweltwärme basieren, zum Beispiel durch elektrische Wärmepumpen und/oder Solarthermie. Sonnen- und Windenergie ist

¹⁷ Siehe zu Ausführungen zu den Primärenergieeinsparungen von KWK-Anlagen insbesondere Prognos, Fraunhofer IFAM, Öko-Institut, BHKW-Consult, Stiftung Umweltenergierecht (2019), S. 45ff: Auf Basis der Referenzwerte der Energieeffizienzrichtlinie wird darin für das Jahr 2017 eine durchschnittliche Primärenergieeinsparung durch KWK-Erzeugung von etwa 12 % des Primärenergieeinsatzes der ungekoppelten Erzeugung ermittelt. Allerdings verweisen Prognos et al. auf die begrenzte Aussagefähigkeit dieses Durchschnittswertes und die hohe Bandbreite der Primärenergieeinsparungen, insbesondere in Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrades der KWK-Anlage. Die Primärenergieeinsparung für BHKW unter 1 MW beträgt demnach 18 % (bei einem Gesamtwirkungsgrad von 85 %), die der amtlich erfassten Anlagen der öffentlichen Versorgung und der industriellen Kraftwirtschaft bei 11%. Für biogene Anlagen außerhalb der amtlichen Erfassung wird eine Primärenergieeinsparung von 7 % bis 30 % ermittelt. KWK-Förderzuschläge erhalten nur sog. „hocheffiziente“ Anlagen (siehe z.B. § 6 KWKG). Dies sind gemäß EU Effizienzrichtlinie im Fall von kleineren Anlagen (<= 1 MW_{el}) jegliche Anlagen mit Primärenergieeinsparungen, und im Fall von größeren Anlagen (> 1 MW_{el}) solche Anlagen, die mit einer Primärenergieeinsparung von mindestens 10 % einhergehen.

¹⁸ INES (2022).

jedoch – insbesondere im Winter – nicht ständig verfügbar. KWK kann dazu beitragen die erforderliche sicher verfügbare Wärmeenergieleistung bereitzustellen, und ist in der Lage den verbleibenden Wärmebedarf zu decken, wenn die Sonne nicht genug scheint und der Wind nicht ausreichend weht („Residualwärmelast“). Hierzu muss der Betrieb von KWK-Anlagen durch eine zeitliche Entkopplung von Stromerzeugung und Wärmebedarf (über größere Wärmespeicher) zunehmend stromsystemdienlich ausgelegt sein. Dafür sind die entsprechenden Rahmenbedingungen zu schaffen (siehe auch Kapitel 5).

- **Sicherstellung leistungsfähiger Netze** – Die zunehmend dargebotsabhängige Energieerzeugung in lastfernen Windparks und dezentralen Solaranlagen sowie die durch zunehmende Elektrifizierung veränderte Energieverbrauchsstruktur erfordern einen erheblichen Ausbau der Stromnetze. KWK entlastet durch Nutzung des vorhandenen Gasnetzes sowohl das Stromübertragungsnetz, als auch die Stromverteilnetze: Im Fall von Industrie-KWK-Anlagen oder dezentralen KWK-Anlagen zur Quartiers- oder Objektversorgung ebenfalls durch Nutzung der Gasnetze, im Fall von „zentralen“ KWK-Anlagen durch Nutzung von Wärmenetzen (siehe hierzu auch Kapitel 3).
- **Diversifizierung der Energieversorgung:** Zudem wird durch den Erhalt bzw. den Ausbau von Gas- und Wärmenetzen parallel zur auszubauenden Strominfrastruktur auch zusätzliche Resilienz in der Energieversorgung geschaffen. Nicht zuletzt der Angriffskrieg Russlands in der Ukraine seit Ende Februar 2022 hat offenbart, dass eine mangelnde Diversifizierung der Energieträger und Lieferanten eine Gefährdung der Energieversorgung bedeuten kann. Stattdessen gilt es zukünftig, Infrastrukturen, Energieträger und Produzenten bzw. Lieferanten möglichst breit und diversifiziert zu gestalten.

KWK steigert die Kosteneffizienz und gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende

Zudem kann die Nutzung von KWK auch zu Kosteneffizienz und größerer gesellschaftlicher Akzeptanz der Energiewende führen:

- **Kosteneffizienz**
 - **Die Anforderungen unterschiedlicher Wärmenutzer unterscheiden sich erheblich:** In der Industrie kommen einige Prozesswärme-Anwendungen, zum Beispiel in der Textilindustrie oder in der Holzverarbeitung mit Niedrigtemperaturen von unter 100°C aus. Andere Prozess-Anwendungen, zum Beispiel in der Stahl- oder der NE-Metall-Erzeugung, benötigen dagegen Höchsttemperaturen von über 1.000°C. Auch der Gebäudebestand ist sehr heterogen, zum Beispiel in Bezug auf den energetischen Standard, den erforderlichen Aufwand für energetische Sanierung, die Anbindung an Gas- oder Fernwärmenetze oder die finanziellen Möglichkeiten der Bewohner bzw. Inhaber, kostenintensive Sanierungs-Investitionen vorzunehmen.
 - Entsprechend hat sich in der Wärmeversorgung historisch ein Mix von Wärmelösungen herausgebildet, basierend auf verschiedenen Infrastruktursäulen (Gasnetze, Stromnetze, Wärmenetze, Lieferungen von Flüssigbrennstoffen oder Holz, ...) und Wärmeenergieerzeugungstechnologien. Aufgrund der Heterogenität der nutzerseitigen Anforderungen sowie der sehr

unterschiedlichen Stärken und Schwächen der verschiedenen Wärmelösungen **wird es auch im Rahmen einer klimaneutralen Wärmeversorgung einen breiten Mix an Wärmelösungen geben müssen**. Beispielsweise stellen elektrische Wärmepumpen eine effiziente und geeignete Lösung für Neubauten und gut sanierte Bestandsgebäude oder für die Bereitstellung von industrieller Prozesswärme auf Niedertemperaturniveau dar. Sie werden voraussichtlich eine wesentliche Rolle bei der Realisierung der Wärmewende einnehmen. Nicht oder teilsanierte Bestandsgebäude oder Hochtemperatur-Prozesswärme-Anwendungen erfordern hingegen andere Wärmelösungen. **In diesen Bereichen werden gasbasierte Wärmeanwendungen auch zukünftig eine wesentliche Rolle spielen**, und im Vergleich zu einer „All Electric“-Lösung zu geringeren Gesamtsystemkosten führen.

- Gegenüber einer getrennten Strom- und Wärmeerzeugung geht KWK in der Regel zunächst mit zusätzlichen Kapitalkosten einher. Im Gegenzug kommt es durch die gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung zu einer besseren energetischen Ausnutzung der Primärenergie, und es wird folglich weniger Brennstoff zur Bedienung des gegebenen Strom- und Wärmebedarfs benötigt. Hierdurch **werden durch die KWK im Betrieb Kosten gegenüber einer getrennten Strom- und Wärmeerzeugung eingespart**. Diese Vorteile der KWK sind umso größer, je ambitionierter das Klimaschutzziel und je knapper und teurer der Brennstoff ist. Spätestens durch die im Zuge des russischen Angriffskrieges in der Ukraine weiter stark gestiegenen Erdgaspreise und die absehbar zu erwarteten signifikanten Kosten für emissionsarmen Wasserstoff ist eine effiziente Nutzung des Brennstoffs zur Strom- und Gaserzeugung so essenziell wie nie zuvor.
- **Gesellschaftliche Akzeptanz:** Der aufgrund lokaler Widerstände stockende Ausbau der Stromnetze auf Höchst- und Hochspannungsebene ist seit Jahren eine der zentralen Hürden für den Erfolg der Energiewende. Durch die Beibehaltung und den weiteren Ausbau von KWK wird – wie zuvor erläutert – der Stromnetzausbaubedarf verringert, und so zur Akzeptanz und Umsetzung der Energiewende beigetragen.

Abbildung 12 Zusammenfassung möglicher Beiträge der KWK für die zukünftige Wärmeversorgung



Quelle: Frontier Economics

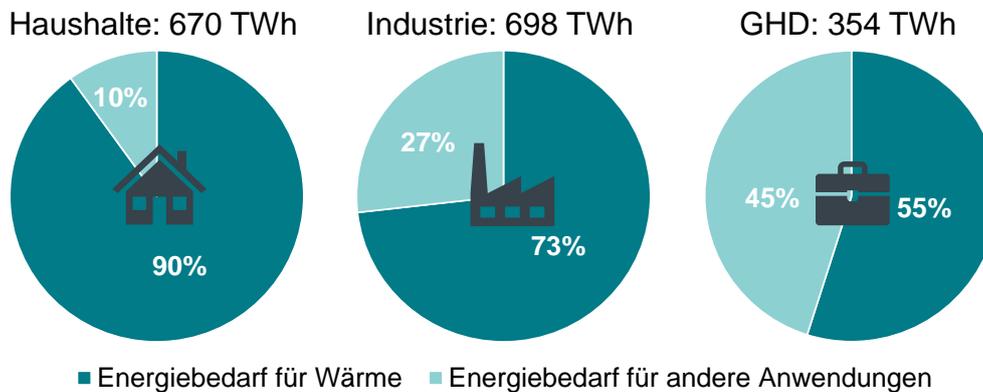
2.2 Die Transformation der Wärmeversorgung ist eine große Herausforderung

Die Wärmeversorgung verursacht über 50 % des gesamten Endenergiebedarfs in Deutschland

Die Wärmeversorgung hat einen hohen Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland: Für die Erzeugung von Wärme wurden im Vor-Corona-Jahr 2019 604 TWh Endenergie für Haushalte und 194 TWh für GHD benötigt. Darüber hinaus wurden 511 TWh in der Industrie, vor allem für Prozesswärme, eingesetzt

(Abbildung 13). Mit einem Endenergiebedarf von insgesamt 1.309 TWh (2019) ist die Wärmeversorgung daher für über 50 % des gesamten Endenergiebedarfs (von 2.495 TWh) in Deutschland verantwortlich.¹⁹

Abbildung 13 Endenergieverbrauch von Haushalten, Industrie und GHD nach Anwendung und Sektor (2019)



Quelle: Frontier Economics basierend auf BMWi (2021) Zahlen und Fakten: Energiedaten.

Bisher stammen lediglich 13 % der Wärme aus erneuerbaren Quellen

Die Wärmeerzeugung beruht aktuell noch zu **hohen Anteilen auf der Verbrennung fossiler Energieträger**. So werden etwa 70 % der für Raumwärme und für Warmwasser verbrauchten Endenergie auf Basis fossiler Energieträger wie Erdgas, Kohle und Öl bereitgestellt (2019). Für Prozesswärme in der Industrie und GHD beträgt dieser Anteil etwa 65 %. Wenn die Verwendung von Erdgas, Kohle und Öl in der Erzeugung der Sekundärenergieträger Fernwärme und Strom berücksichtigt wird, liegen die Anteile der fossilen Energieträger jeweils noch deutlich höher.²⁰ Über den gesamten deutschen Wärmemarkt hinweg liegt daher der Anteil erneuerbarer Energieträger bei etwa 13 % (2019)²¹.

Die Bundesregierung hat in ihrem in 2021 beschlossenen Koalitionsvertrag das Ziel ausgegeben, bis 2030 50 % des Gesamtwärmebedarfs klimaneutral zu erzeugen.²²

Zur Erreichung der Klimaziele müssen die THG-Emissionen im Wärmemarkt kurzfristig rapide gesenkt werden

Gemäß Klimaschutzgesetz sollen die THG-Emissionen im Gebäudesektor bis 2030 auf 67 Mio. t CO₂-äq. gesenkt werden (im Vergleich zu 118 Mio. t im Jahr 2020), sowie in der Industrie auf 118 Mio. t CO₂-äq. (im Vergleich zu 186 Mio. t im Jahr 2020).²³

¹⁹ BMWi (2021a).

²⁰ BMWi (2021a).

²¹ Siehe Abbildung 10 Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Strom und Wärme in Deutschland 2019

²² „Wir streben einen sehr hohen Anteil Erneuerbarer Energien bei der Wärme an und wollen bis 2030 50 Prozent der Wärme klimaneutral erzeugen.“, SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021), S. 58.

²³ KSG 2021, Anlage 2 (zu § 4).

Innerhalb von 10 Jahren müssen daher die Emissionen im Gebäudesektor um 43 % und in der Industrie um 37 % sinken. Ein direkter Vergleich macht deutlich, welche erhebliche Anstrengung das bedeutet: In den fast 30 Jahren zwischen 1990 und 2019 wurden die CO₂-Emissionen im Gebäudesektor um eine ähnliche Größenordnung von etwa 44 % reduziert, wobei rund die Hälfte dieser Reduktionen in die Dekade nach der Wiedervereinigung von 1990 bis 2000 fällt.

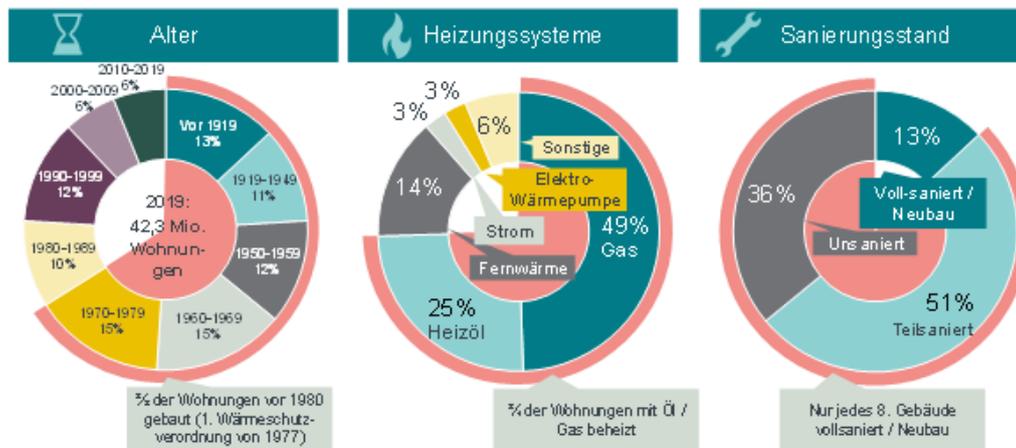
Die Anforderungen an Wärmelösungen im Gebäudesektor sind vielfältig

Die Herausforderung für den Gebäudesektor wird durch einen Blick auf die Eigenschaften des Bestands am Beispiel der bestehenden Wohngebäude verdeutlicht (Abbildung 14):

- Etwa **zwei Drittel der Wohnungen wurden vor 1980 gebaut**. Die erste Wärmeschutzverordnung wurde 1977 eingeführt, sodass der vor dieser Zeit errichtete Gewerbegebäude überwiegend mit sehr geringen Wärmeschutzstandards gebaut wurde.
- Etwa **drei Viertel der Wohneinheiten werden mit Gas oder Öl beheizt**. Von den etwa 40,6 Mio. Wohneinheiten werden etwa 3 % mit einer Wärmepumpe beheizt (2019).²⁴
- Über **80 % der Gebäude sind entweder teilsaniert oder unsaniert**. Die Sanierung des Gebäudebestands auf moderne energetische Standards beansprucht zudem einen hohen Kapital- und Personalaufwand sowie viel Zeit. Seit vielen Jahren wird konstant nur etwa 1 % der Wohnfläche pro Jahr energetisch saniert – trotz intensiver Bemühungen seitens der Politik, die Sanierungen zu beschleunigen.

²⁴ BDEW (2019b).

Abbildung 14 Struktur des Wohngebäudebestands nach Baualter, Heizungssystem und Sanierungsstand



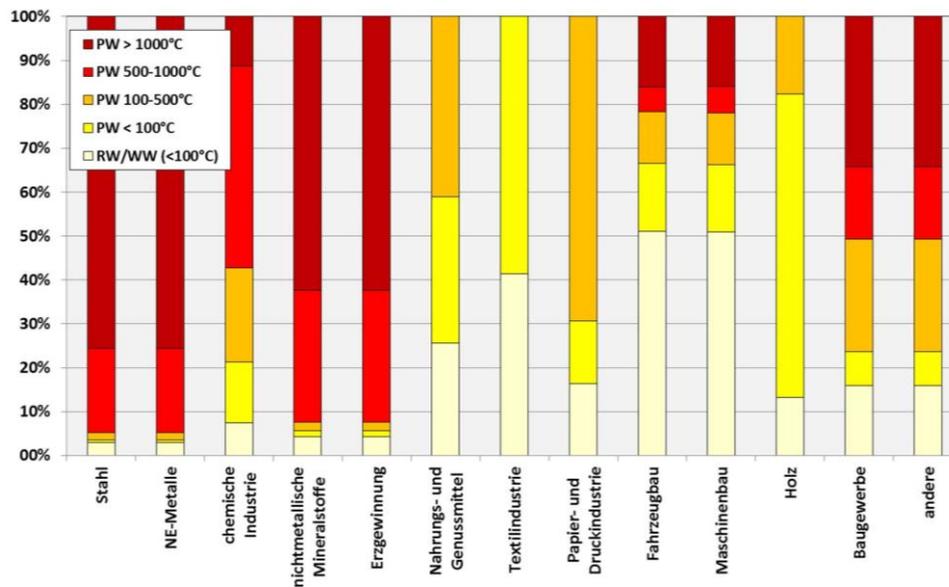
Quelle: FfE (2020) DemandRegio, IWU (2018) Endbericht Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016.

Heterogene Anforderungen an die Wärmeversorgung in der Industrie

Die Anforderungen von Industrieanwendungen an die Wärmeversorgung variieren ebenfalls stark. Ein wichtiges Kriterium zur Einordnung der Anforderung an die Wärmeversorgung ist die erforderliche Temperatur:

- Industrielle **Niedertemperaturprozesse** umfassen den Temperaturbereich bis etwa 150°C. Wichtige Wirtschaftsbereiche sind hier beispielsweise die Holzverarbeitung sowie die Lebensmittelbranche (Abbildung 15).
- **Mitteltemperaturprozesse** umfassen Temperaturen bis etwa 500 °C. Darunter fallen zum Beispiel Teile der Nahrungsmittelbranche und der Papierindustrie.
- **Hochtemperaturprozesse** benötigen Wärme mit über 500 °C. Wichtige Branchen mit solchen Temperaturanforderungen sind vor allem die Erzeugung von Stahl und anderen Metallen, die Mineral- und Erzgewinnung sowie die chemische Industrie.

Abbildung 15 Endenergieverbrauch für Wärme nach Temperatur- und Industriebereichen (2016)



Quelle: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2021). Prozesswärme (PW), Raumwärme (RW), Warmwasser (WW).

Die Sicherheit der Wärmeversorgung muss jederzeit gewährleistet sein

Bei der Umstellung auf klimaneutrale Wärmeversorgungslösungen müssen zudem die Auswirkungen auf die **Versorgungssicherheit** berücksichtigt werden. Für eine sichere Wärmeversorgung ist entscheidend, dass die Infrastruktur auch für Phasen sehr hoher Nachfrage (Leistungsspitzen) während der Heizperiode ausgelegt ist.

Der Energiebedarf für die Erzeugung von Prozesswärme (v. a. in der Industrie) und Warmwasser ist weitgehend gleichmäßig über das Jahr verteilt. Doch bei der Raumwärmebereitstellung besteht eine erhebliche Saisonalität, da die Energienachfrage im Herbst und Winter deutlich höher ist als im Sommer. Neben dieser vorhersehbaren saisonalen Zykliz muss die Wärmeinfrastruktur auf Kältephasen von mehreren Tagen und Wochen in Normalwintern sowie auf extreme Winter ausgelegt sein, auch wenn diese nur selten auftreten.

Das Gassystem ist auf diese Anforderungen des Wärmemarktes ausgelegt:

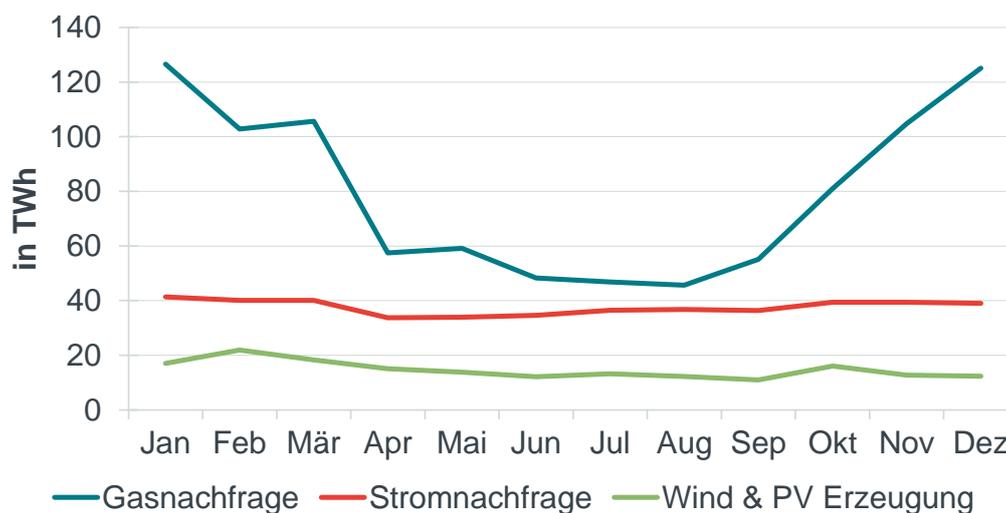
So beträgt beispielsweise der gesamte Gasverbrauch im kältesten Monat (Januar oder Februar) schon in durchschnittlichen Jahren etwa das Dreifache des Verbrauchs im wärmsten Monat (Juli oder August). Dies illustriert exemplarisch Abbildung 16 für das Jahr 2020. Das Gassystem ist auf diese Anforderungen des Wärmemarktes ausgelegt, durch eine Kombination aus:

- produktionsseitiger Steuerbarkeit (in der Regel durch entsprechende Flexibilitätsklauseln in langfristigen Gaslieferverträgen zwischen Importeuren und Exporteuren),

- eine auf Extremwinter ausgelegte Dimensionierung der Transport- und Verteilnetze, mit einer maximalen zeitgleichen Gaslast von über 250 GW (gemessen am 12. Februar 2021)²⁵,
- sowie Gasspeichern (mit einem Speichervolumen von in Deutschland etwa 260 TWh), die den Spitzenbedarf bzw. den Gasbedarf über mehrere Wochen decken können.

Die Stromnachfrage ist dagegen in der Jahresbetrachtung von weniger Saisonalität geprägt als die Gasnachfrage (Abbildung 16), und das Stromsystem bislang entsprechend für dieses Bedarfsprofil dimensioniert. Die maximale Nachfragespitze betrug bislang in Deutschland etwa 77 GW (2019) und ist damit deutlich geringer als die maximale zeitgleiche Gaslast von über 250 GW.²⁶ Ölbasierte Heizsysteme tragen weitere knapp 100 GW Leistung zur Infrastruktur für den Wärmemarkt bei.²⁷ Die hohe Saisonalität der Wärmenachfrage wird also durch die Leistungsabgabe der Gas- und Ölsysteme in den Wintermonaten charakterisiert, die weit höher ist als die Leistungsspitzen in den heutigen Stromnetzen.

Abbildung 16 Monatlicher Gasverbrauch, Stromverbrauch und Stromerzeugung aus Wind und PV (2020)



Quelle: Frontier Economics basierend auf Eurostat, Destatis und Fraunhofer ISE.

Um im Zuge der Transformation zur Klimaneutralität weiterhin einen Beitrag zur sicheren Wärmeversorgung leisten zu können, muss das Gassystem auf klimafreundliche Energieträger wie Biomethan und dekarbonisierten Wasserstoff umgestellt werden (siehe hierzu Kapitel 4).

²⁵ Frontier Economics (2021b).

²⁶ EWI (2021b). Im Winter 2012/2013 betrug die Höchstbelastung rund 81 GW (<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energie/wende/spitzenlast-614922>).

²⁷ Frontier Economics (2021b).

2.3 Wärmeversorgung für Gebäude und Industrie erfordert eine Vielfalt an Technologien

Wie im voran gegangenen Kapitel dargestellt variieren die Anforderungen an die Wärmeversorgung unterschiedlicher Gebäude und unterschiedlicher Industrien stark, sodass eine Vielzahl an Technologien heute und voraussichtlich auch zukünftig eingesetzt wird. In diesem Kapitel analysieren wir verschiedene Wärmeversorgungslösungen mit Blick auf ihre technischen und wirtschaftlichen Merkmale („Kriterien“) im Zuge einer klimaneutralen Wärmeversorgung. Hierzu:

- erläutern wir die von uns betrachteten Wärmeversorgungslösungen und die zur Analyse verwendeten Kriterien (Kapitel 2.3.1);
- fassen wir die wesentlichen Erkenntnisse des Vergleichs für Wärmeversorgungslösungen in **Gebäuden** (Kapitel 2.3.2) und zur Versorgung mit Prozesswärme in der **Industrie** zusammen (Kapitel 2.3.3).

2.3.1 Untersuchte Wärmeversorgungslösungen und verwendete Bewertungskriterien

Wir beschränken uns auf die wesentlichen Wärmeversorgungslösungen, deren Betriebsweise kurz- oder mittelfristig defossilisiert werden kann. Die betrachteten Technologien umfassen:

- Unterschiedliche Ausführungen der **Wärmepumpe**: Elektrische Wärmepumpe, Hybrid-Wärmepumpe und Großwärmepumpe mit Fernwärmeversorgung;
- **Gasbrennwertkessel und Ölbrennwerttherme** auf Basis eines erneuerbaren oder dekarbonisierten Brennstoffs;
- **Zentrale KWK** zur Fernwärmeversorgung und **dezentrale KWK** (z.B. BHKW oder Gasturbine) auf Basis eines erneuerbaren oder dekarbonisierten Brennstoffs;
- **Brennstoffzelle** auf Basis eines emissionsarmen Brennstoffs; und
- **Pellet- oder Hackschnitzelheizung**.

Weitere Wärmeversorgungstechnologien, wie zum Beispiel Solarthermie, Geothermie und Fernwärme mit industrieller Abwärme werden in der Diskussion berücksichtigt. Zum Teil stellen diese jedoch keine alleinstehende Wärmeversorgungslösung dar (z. B. bei Solarthermie oder ggfs. bei Fernwärme mit industrieller Abwärme), da eine zusätzliche (steuerbare) Back-up-Technologie zur dauerhaften Wärmeversorgung benötigt wird. Dies resultiert aus wetterbedingten (beispielsweise volatile Sonneneinstrahlung) oder produktionsseitigen (für die industrielle Abwärme) Angebotsrestriktionen, die nicht zu jedem Zeitpunkt mit dem zu deckendem Wärmeprofil übereinstimmen.

Kriterien zur Bewertung verschiedener Wärmeversorgungslösungen

Auch bei einer zukünftig klimaneutralen Wärmeversorgung muss eine Vielzahl von Parametern berücksichtigt werden. Diese Parameter variieren je nach Energieverbrauchssektor und zudem innerhalb der verschiedenen Kundengruppen. Eine

technisch-ökonomische Bewertung verschiedener Wärmeversorgungslösungen muss dabei (mindestens) die folgenden Kriterien umfassen:

- **Anwendungsmöglichkeiten:** Eignung der Technologie für bestimmte Kategorien an Versorgungsaufgaben (z. B. Raumwärme von Objekten, Prozesswärme oder Fernwärme).
- **Wirkungsgrad:** Verhältnis des Energieeinsatzes zu Strom- und Wärmeabgabe.
- **Steuerbarkeit:** Einsatzmöglichkeiten der Anlage, um auf Nachfrageschwankungen zu reagieren. Hier kann beispielsweise zwischen einem verlässlichen Grundlastbetrieb, einer flexibel der Residuallast angepasst steuerbaren Anlage oder auch einer volatilen, kaum planbaren Wärmequelle unterschieden werden. Auch die Möglichkeit, das Temperaturniveau der Wärmeversorgung kurzfristig anzupassen, fällt hierunter.
- **Systemauswirkungen im Wärmesektor:** Darstellung der Auswirkung auf das Wärmesystem; zum Beispiel, ob größere Infrastrukturinvestitionen notwendig sind oder inwieweit die Anlage die Versorgungssicherheit des Gesamtsystems erhöht oder einschränkt.
- **Systemauswirkungen im Stromsektor:** Darstellung der Auswirkung auf das Stromsystem; je nach Brennstoff oder Fahrweise einer Wärmequelle kann sich eine stabilisierende oder auch schwankungsverstärkende Wirkung auf das Stromsystem ergeben.
- **Kosten und Nutzen für den Endanwender:** Eine Einschätzung der Kosten für die Anlage und den Brennstoff kann wichtige Anhaltspunkte für die Wirtschaftlichkeit des Verbrauchers geben. Darüber hinaus sind weitere Aspekte wie Platzbedarf oder Komfort von Bedeutung.

In der Analyse der Wärmeversorgungslösungen liegt der Fokus auf den oben genannten Kriterien bzw. auf den jeweiligen Anwendungsmöglichkeiten und Auswirkungen der Technologien. Wir gehen daher in der Diskussion der Wärmeversorgungslösungen davon aus, dass alle Technologien zukünftig „klimaneutral betrieben“ bzw. klimaneutrale Energieträger eingesetzt werden. Die Analyse erlaubt somit Rückschlüsse, neben den Anwendungsmöglichkeiten und Auswirkungen der Technologien, auf die zukünftig benötigten klimaneutralen Energieträger in der Wärmeversorgung.

2.3.2 Vergleich von Wärmeversorgungslösungen in Gebäuden

Für die Wärmebereitstellung in Gebäuden wird aktuell eine Vielzahl alternativer Versorgungslösungen genutzt. Dies spiegelt die erläuterte Heterogenität der Anforderungen, Voraussetzungen und Präferenzen der Nutzenden wider (Kapitel 2.2). Unsere Analyse von klimaneutralen Wärmeversorgungslösungen zeigt, dass auch **zukünftig nicht davon auszugehen ist, dass sich eine „one-size-fits-all“-Lösung herausbilden wird**. Vielmehr wird die Heterogenität der Wärmeversorgungsaufgaben weiterhin einen **breiten Mix an Wärmeversorgungstechnologien** für unterschiedliche Anwendungsformen und Nutzenden erfordern.

Wir fassen die wesentlichen Erkenntnisse der Betrachtung zusammen – zunächst noch ohne Betrachtung der KWK, welche wir im Nachgang erläutern:

- **Elektrische Wärmepumpen** (auf Basis von erneuerbarem Strom)
 - **Sehr energieeffizient unter guten Bedingungen:** Elektrische Wärmepumpen können durch die Nutzung von Umgebungswärme sehr hohe energetische Wirkungsgrade erreichen. So erreichen Erdwärme-Wärmepumpen eine Jahresarbeitszahl²⁸ von über 4.²⁹ Bei Luft-Wärmepumpen liegt die Jahresarbeitszahl typischerweise etwas niedriger. Daher eignen sich für Wärmepumpen besonders Niedrigenergiegebäude mit Flächenheizungen, also in der Regel Neubauten oder energetisch gut sanierte Bestandsgebäude. Die Bereitstellung geringer Temperaturen für Fernwärme (oder in der Industrie) durch Groß-Wärmepumpen stellt ebenfalls einen geeigneten Anwendungsbereich dar, wobei die örtlich gegebenen Einsatzmöglichkeiten für Groß-Wärmepumpen in Deutschland stark variieren.
 - **Nicht geeignet in unsanierten Bestandsgebäuden:** Zur Bedienung des Wärmebedarfs in nicht oder nur geringfügig sanierten Gebäuden mit hohem Vorlaufemperaturbedarf sind elektrische Wärmepumpen allerdings **aufgrund rapide abnehmender Wirkungsgrade** grundsätzlich nicht geeignet: An einem kalten Wintertag erreicht die Luft-Wärmepumpe in einem unsanierten Altbau lediglich noch einen Wirkungsgrad (bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie) von etwa 160 %. Bei einer Zwischenspeicherung des Stroms aufgrund variabler Strom-Erzeugung würde der Gesamtwirkungsgrad sogar auf etwa 60 % fallen.³⁰ Allerdings sind energetische Sanierungen aufgrund der hohen Kosten und der bei der Herstellung des benötigten Materials verursachten Treibhausgasemissionen nicht für alle Bestandsgebäude sinnvoll.³¹ Des Weiteren zeigt die Erfahrung der letzten 20 Jahre, dass sich energetische Sanierungen aufgrund angebotsseitiger Restriktionen (z. B. Handwerkerverfügbarkeit) und nachfrageseitiger Hürden trotz großer politischer Bemühungen bisher nur langsam vorantreiben lassen.³²
 - **Nicht geeignet für Hochtemperatur-Prozesswärme:** Auch zur Bereitstellung von höheren Temperaturbedarfen in der Industrie sind elektrische Wärmepumpen nur sehr begrenzt bzw. ab bestimmten Temperaturanforderungen (ab ca. 150°C) überhaupt nicht geeignet. Wir werden hierauf noch im Detail in Kapitel 2.3.3 eingehen.
 - **Verstärken die Herausforderungen für das Stromsystem:** Elektrische Wärmepumpen „importieren“ zudem die Herausforderungen der hohen

²⁸ Die Jahresarbeitszahl beschreibt das Verhältnis von gewonnener Wärmeenergie zu eingesetzter elektrischer Energie im Jahresdurchschnitt.

²⁹ UBA (2021d). Für einzelne Anwendungsbereiche, v. a. die Trinkwarmwasserbereitung, können die Werte deutlich darunter liegen. Nach Hönig (2011) kann die Jahresarbeitszahl um ca. 20 % geringer ausfallen. Ähnliches gilt auch, wenn andere Kenngrößen wie der leistungsorientierte COP (Coefficient of Performance) betrachtet werden.

³⁰ Siehe hierzu z. B. auch Frontier Economics (2021b). Der Wirkungsgrad bei einer Zwischenspeicherung des Stroms wurde ermittelt bei einem Speicherungsanteil von 80 % des Stroms mit Wirkungsgradverlustes bei der Speicherung (5 %) und Rückverstromung (60 %).

³¹ Dazu kommen hohe Anschaffungskosten für die Wärmepumpe selbst und ggf. eine Umstellung auf Flächenheizkörper, welche die Kosten für die Sanierung weiter erhöhen.

³² Siehe hierzu z. B. Frontier Economics (2020), Kapitel 2.2.

saisonalen Abhängigkeit des Wärmebedarfs in das Stromsystem. Dies ist umso ausgeprägter, je eher elektrische Wärmepumpen auch in nicht ideal geeigneten Gebäuden mit geringen Wirkungsgraden zum Einsatz kommen. In Verbindung mit der ohnehin erforderlichen Umstellung von steuerbaren fossil gefeuerten Kraftwerken auf überwiegend dargebotsabhängige erneuerbare Energien wie Wind- und PV-Anlagen bedingt eine Elektrifizierung des Wärmebedarfs daher einen substanziellen zusätzlichen Ausbaubedarf im gesamten Stromsystem – also Stromerzeugung, Stromspeicherung und Transport- wie Verteilnetze (siehe hierzu Kapitel 3).

- **Ergänzung der Wärmepumpe kann nur bedingt Abhilfe schaffen:** Ein Teil der Schwächen der elektrischen Wärmepumpe kann durch Ergänzungen in der Anlagenkonfiguration ausgeglichen werden: Beispielsweise kann eine Hybrid-Wärmepumpe (elektrische Wärmepumpe ergänzt um einen Gasbrennwertkessel zum Abfahren von Lastspitzen) an kalten Tagen die stark sinkende Energieeffizienz und die damit verbundenen Anforderungen an das Stromsystem teilweise kompensieren. Allerdings erhöht dies auch die anfallenden Kosten, da mehrere Systeme zur Deckung des Wärmebedarfs vorgehalten werden müssen. Auch Solarthermie in Verbindung mit Wärmespeicher(n) zur Zwischenspeicherung der auf dem Dach erzeugten Wärme oder Photovoltaik mit Batteriespeicher(n) können die Herausforderungen teilweise abmildern. Allerdings sind von der Sonnenenergie abhängige Technologien zur Deckung des in der dunklen Winterjahreszeit anfallenden Raumwärmebedarfs nur bedingt geeignet.³³ Zudem sind dezentrale Wärmespeicher und Batteriespeicher-Kapazitäten nur in der Lage kurzfristige Engpässe zu überbrücken.
- **Gasbrennwertkessel (auf Basis von Biomethan und klimaneutralem Gas)**
 - **Nutzung vorhandener Gas-Infrastruktur, welche auf eine sichere Wärmeversorgung ausgelegt ist:** Im Jahr 2019 wurden fast 50 % der Wohneinheiten in Deutschland mit Gasheizungen (exkl. Fernwärme) erwärmt (Abbildung 14). Durch große Speicherkapazitäten für Gas (Kavernenspeicher) sowie bestehende Kapazität der Transport- und Verteilnetze ist die gasbasierte Wärmeversorgung gut für Extremwintertage ausgelegt. Durch eine zukünftige (Weiter-)Nutzung von H₂-ready gasbasierten Wärmeanwendungen wie Gasbrennwertkesseln kann daher die Elektrifizierung in Teilen der Wärmeversorgung begrenzt und so auch die Resilienz der Energieversorgung gestärkt werden.
 - **Nutzung vorhandener Brennwertkessel („Wasserstoff-Readiness“):** Heute noch weitgehend auf Erdgas basierende Gasbrennwertkessel können auf Biomethan, und zukünftig auch auf klimaneutralen Wasserstoff, umgestellt werden. In den Bestand gasbasierter Brennwertgeräte können gemäß Heizungsherstellern heute bereits ohne Anpassungsbedarf mindestens 10 Volumenprozent Wasserstoff beigemischt werden. Die jüngsten Generationen gasbasierter Brennwertgeräte könnten zwischen 20 und 30 Volumenprozent Wasserstoffbeimischung ohne signifikante Mehrkosten

³³ So betrug bspw. der durchschnittliche Ertrag von Solarzellen in Deutschland im Jahr 2020 im Juli über 130 kWh/kW_p, während im Dezember dieser Wert unter 20 kWh/kW_p lag. Bei langjährigen Vergleichen ergeben sich sogar Spannbreiten zwischen 190 kWh/kW_p und 0 kWh/kW_p. Vgl. Hochschule Trier (2021).

sicher verarbeiten. Zudem sind einfache und kostengünstige Nachrüstlösungen durch deutsche Heizungsgerätehersteller für die Zeit ab 2025 angekündigt, damit diese mit 100 % Wasserstoff betrieben werden können. Der gesamte Bestand der Gasheizungen kann so innerhalb typischer Erneuerungszyklen vor 2045 auf eine volle Wasserstoffverträglichkeit umgestellt werden.³⁴ Analog bereiten derzeit auch die Gasnetzbetreiber eine sukzessive Umrüstung der Transport- und Verteilnetze auf einen Betrieb mit 100 % Wasserstoff vor.³⁵

- **Wirkungsgrad niedriger als bei elektrischen Wärmepumpen, jedoch nahezu unabhängig von Außen- und Vorlauftemperaturen:** Der Gesamtwirkungsgrad der Wärmeversorgung³⁶ ist bei gasbasierten Heizungssystemen in Neubauten oder vollsanierten Bestandsbauten denen von elektrischen Wärmepumpen unterlegen. Im Vergleich hierzu besteht der Vorteil von Gasbrennwertkesseln, neben den vergleichsweise geringen Investitionskosten, darin, dass der Jahresnutzungsgrad nahezu unabhängig von Außentemperaturen und benötigten Vorlauftemperaturen ist. Zudem führt die Zwischenspeicherung von Wasserstoff und Biomethan nur zu geringen Umwandlungsverlusten.³⁷ Gegenüber der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen hat die getrennte Erzeugung aus zum Beispiel Brennwertkesseln (Wärme) und Turbinen (Strom) jedoch einen höheren Primärenergiebedarf.
- **Brennstoffzelle** (auf Basis von klimaneutralem Gas): Auch die stationäre Brennstoffzelle ist eine Technologie zur gleichzeitigen Bereitstellung von Strom und Wärme (KWK-Technologie), welche grundsätzlich **hohe Wirkungsgrade** aufweist. In der Industrie sind die Anwendungsmöglichkeiten allerdings durch Grenzen in den erzielbaren Output-Temperaturen beschränkt. In Gebäuden besteht neben den hohen Anschaffungskosten u. a. die Herausforderung, dass **Brennstoffzellen hochreinen Wasserstoff benötigen**, welcher ggf. nicht durch die Verteilnetze zu liefern sein wird. Eine dezentrale Aufbereitung des Wasserstoffs in einzelnen Gebäuden ist wiederum aufwändig. Eine bereits in der Praxis eingesetzte Alternative sind Brennstoffzellen, die mit Methan – d.h. auch mit Biomethan – über den bestehenden Erdgasanschluss gespeist werden und den Wasserstoff lokal produzieren (Methanol-Reformer), während der Kohlenstoff gespeichert wird.
- **Ölbrennwerttherme** (auf Basis biogener oder synthetischer Flüssigbrennstoffe): Derzeit werden noch etwa 25 % der Wohneinheiten in Deutschland mit Ölheizungen erwärmt (Abbildung 14). In einer klimaneutralen Wärmeversorgung könnte fossiles Heizöl durch biogene oder synthetische Flüssigbrennstoffe auf Basis von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff ersetzt werden. Vor allem **in ländlichen Regionen mit bestehenden Ölheizungen und**

³⁴ Siehe auch Frontier Economics (2021a).

³⁵ Siehe auch DVGW (2020), Guidehouse (2022).

³⁶ Der Gesamtwirkungsgrad eines Wärmeversorgungssystems beschreibt das Verhältnis der Wärmeerzeugung zur erforderlichen Primärenergie unter Berücksichtigung von Energieverlusten durch Energieumwandlung und -transport. Siehe für eine detaillierte Analyse von Gesamtwirkungsgraden zum Beispiel Frontier (2021b), Kapitel 3.

³⁷ Siehe Frontier Economics (2021b) für ausführliche Erläuterungen und Analysen zum (Gesamt-) Wirkungsgrad verschiedener Wärmeversorgungssysteme unter unterschiedlichen Bedingungen.

schwächerer Infrastrukturanbindung (Strom, Gas, Fernwärme) kann der Einsatz von Flüssigbrennstoffen nach heutigem Kenntnisstand sinnvoll sein.

- **Pellet- oder Hackschnitzelheizung:** Pellet- oder Hackschnitzelheizungen stellen eine weitere Option für eine klimaneutrale Wärmeversorgung dar, die schon heute technisch etabliert ist. Wesentliche Vorteile bestehen in der guten Steuerbarkeit und der Unabhängigkeit von leitungsgebundenen Infrastrukturen.
 - Auch wenn Holzheizsysteme grundsätzlich als klimaneutral einzustufen sind, bleiben sie doch nicht ohne Umweltwirkungen. Speziell lokale Schadstoffe wie Feinstaub werden im Regelfall emittiert und können nur durch den zusätzlichen Einbau eines Filters oder Staubabscheiders reduziert werden. Dies ist mit zusätzlichen Investitionskosten, die je nach verbauter Technik variieren und/oder laufenden Kosten für Wartung und Stromverbrauch verbunden.³⁸
 - Einem umfassenden Markteintritt könnten die begrenzten nachhaltigen Brennstoffpotenziale entgegenstehen, welche aufgrund der vergleichsweise geringen Energiedichte zudem möglichst örtlich bezogen werden sollten. Da die Bevorratung des Brennstoffs zudem einen vergleichsweise hohen Platzbedarf mit sich bringt, können **Pellet- und Hackschnitzelheizungen vor allem für den Ersatz von Ölheizungen in Gebäuden in ländlichen Regionen mit der erforderlichen Platzverfügbarkeit aber schwächerer Infrastrukturanbindung** zum Einsatz kommen.

Es zeigt sich, dass die verschiedenen betrachteten Wärmeversorgungs­lösungen mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen verbunden sind und voraussichtlich in unterschiedlichen Anwendungen und unterschiedlichem Ausmaß zukünftig eine Rolle für eine klimaneutrale Wärmeversorgung spielen werden. Abbildung 17 fasst die vergleichende Bewertung der Wärmeversorgungs­lösungen in Gebäuden anhand der beschriebenen Kriterien vereinfachend zusammen. Eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Bewertungen kann Anhang A entnommen werden. Nachfolgend gehen wir näher auf den möglichen Beitrag der KWK für eine klimaneutrale Wärmeversorgung ein.

³⁸ Vgl. UBA (2020b).

Abbildung 17 Vereinfachte Übersicht der Bewertung der Wärmeversorgungssysteme in Gebäuden

Wärmeversorgungslösung	Anwendungsmöglichkeiten	Wirkungsgrad ¹	Steuerbarkeit	Systemauswirkung	Auswirkung auf Stromsystem	Kosten/Nutzen für Anwender ¹
Elektrische Wärmepumpe	0 V.a. in gut gedämmten Gebäuden	+ Sehr hohe Jahresarbeitszahl	0 Unterbrechbar falls Eingriffsrecht für Netzbetreiber	0 I.d.R. keine zusätzl. Infrastruktur zu Stromnetzanschluss	- Bringt Wärme-Saisonalität in den Stromsektor	+ Vorteilhaft, wenn Gebäude geeignet
Hybrid-Wärmepumpe	0 V.a. in gut gedämmten Gebäuden und im Bestand	+ Sehr hohe Jahresarbeitszahl	+ Unterbrechbar, z.B. durch Netzbetreiber	+ Versorgungssicherheit durch Gasinfrastruktur	- Bringt Wärme-Saisonalität in den Stromsektor	+ Vorteilhaft, wenn Gebäude geeignet
Großwärmepumpe mit Fernwärmeversorgung	+ In allen Gebäudetypen möglich	+ Sehr hohe Jahresarbeitszahl	0 Auslegung i.d.R. auf Grundlast	0 Perspektivisch Weiterbetrieb von Fernwärmenetzen	- Bringt Wärme-Saisonalität in den Stromsektor	0 Aktuell hohe Invest.-kosten, individuelle Bewertung notwendig
Gasbrennwertkessel	+ In allen Gebäudetypen möglich	0 Hohe Wirkungs- und Jahresnutzungsgrade, ggf. H ₂ -Umwandlungsverluste	0 In Praxis nicht üblich, aufgrund Netzatmung auch nicht notwendig	+ Versorgungssicherheit durch Gasinfrastruktur	0 Keine direkten	0 Anschaffungskosten moderat, steigende Brennstoffkosten
Zentrale KWK mit Fernwärme	+ Alle Gebäudetypen, v.a. in Regionen mit Fernwärmenetz	+ Sehr hoher Gesamtwirkungsgrad, ggf. H ₂ Umwandlungsverluste	0 Output steuerbar, Strom-/Wärmeabhängigkeit	+ Brennstoffumrüstung vieler Einheiten möglich	+ Entlastend bei flexibler Fahrweise	0 Geringe Anschaffungskosten, ggfs. hohe Verbrauchskosten
Dezentrales BHKW	+ In allen Gebäudetypen möglich	+ Sehr hoher Gesamtwirkungsgrad, ggf. H ₂ Umwandlungsverluste	0 Output steuerbar, Strom-/Wärmeabhängigkeit	+ Versorgungssicherheit durch Gasinfrastruktur	+ Entlastend bei flexibler Fahrweise, dezentrale Erzeug.	0 Hohe Anschaffungskosten
Brennstoffzelle	+ In allen Gebäudetypen möglich	+ Sehr hoher Gesamtwirkungsgrad, hoher Stromanteil	0 Output steuerbar, Strom-/Wärmeabhängigkeit	0 Tlw. bestehende Erdgasinfrastruktur nutzbar, ggf. neue Leitungen notwendig	+ Entlastend durch dezentrale Stromerzeugung	- Hohe Anschaffungskosten
Ölbrennwerttherme	0 Vorrangig im Bestand bei Ersatz alter Ölkessel in Kombination mit regenerativer Wärme	0 Hohe Wirkungs- und Jahresnutzungsgrade	+ Anlage durch Kunden flexibel einsetzbar	+ Dezentrale Versorgung ohne Netzstrukturen	0 Keine	0 Anschaffungskosten moderat, steigende Brennstoffkosten
Pellet- oder Hackschnitzelheizung	0 V.a. in ländlichen Regionen, Brennstoff verfügbar	0 Hoher Gesamtwirkungsgrad	+ Anlage durch Kunden flexibel einsetzbar	+ Dezentrale Versorgung ohne Netzstrukturen	0 Keine	+ Moderate Anschaffungs- und Brennstoffkosten

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: ¹Relative Bewertung zwischen den Technologien, keine absolute Bewertung. Eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Bewertungen kann Anhang A entnommen werden.

KWK ist vielfältig und spielt in verschiedenen Bereichen der Wärmerversorgung eine wichtige Rolle

KWK ist eine etablierte Technologie zur Wärme- und Stromversorgung: In Deutschland werden etwa 17 % der Netto-Wärmerzeugung durch KWK-Anlagen bereitgestellt (2019).³⁹ Auch in einer klimaneutralen Wärmeversorgung sowie in der Transformation dorthin kann die KWK aufgrund ihrer Charakteristika eine entscheidende Rolle spielen:

- **Vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für KWK-Anlagen:** Die Anwendungsmöglichkeiten der KWK sind sowohl für die zentrale als auch dezentrale KWK vielfältig. Aufgrund der Breite an Anlagentypen mit unterschiedlicher Erzeugungsleistung und Temperatur der erzeugten Wärme **kann die KWK in allen Gebäudetypen eingesetzt werden**. Neben einer im Einzelfall zu prüfenden Wirtschaftlichkeit stellen die lokale Verfügbarkeit bzw. Realisierbarkeit eines Gasnetzes und von Fern- und Nahwärmeleitungen in dünn besiedelten Regionen eine Einschränkung für den Einsatz von KWK-Anlagen dar. Dieses breite Anwendungsspektrum erreicht mit Ausnahme der Gasbrennwerttherme keine andere Wärmequelle im Gebäudesektor.
- **Hoher Wirkungsgrad der KWK-Anlagen:** Durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme wird die eingesetzte Energie bestmöglich genutzt. Die KWK weist entsprechend **hohe Gesamtwirkungsgrade** (85-95 %) und damit eine hohe Brennstoff-Ausnutzung im Vergleich zu einer getrennten Erzeugung von Strom oder Wärme auf.⁴⁰ Während beispielsweise bei der reinen Stromerzeugung „auf der grünen Wiese“ die „Abwärme“ der Umwelt (vor allem Flüssen) zugeführt wird, wird die „Abwärme“ bei der KWK-Erzeugung effizient genutzt und den Wärmenetzen bzw. im Fall der Objektversorgung einer unmittelbaren Wärmenutzung vor Ort zugeführt. Auf diese Weise verringert KWK den Bedarf nach Brennstoffen für die Wärmeerzeugung. Dadurch reduziert sich der Primärenergieverbrauch gegenüber einer getrennten Strom- und Wärmeerzeugung signifikant (um bis zu 30 %).⁴¹
- **KWK-Anlagen sind steuerbar und somit auch als wichtiges Infrastrukturelement in Wärmenetzen geeignet:** Sowohl zentrale als auch dezentrale KWK-Anlagen können entsprechend der (residualen) Strom- und Wärmenachfrage flexibel gesteuert werden. Viele andere zukunftssträchtige Wärmequellen sind dagegen ...
 - ... entweder stärker technisch begrenzt in ihrer Steuerbarkeit, d. h. sie können Wärme nur grundlastorientiert, also beispielsweise zu jeder Stunde ungefähr in gleichen Größenordnungen zur Verfügung stellen. Hier sei beispielsweise die tiefe Geothermie genannt. Oder ...
 - ... abhängig von externen Einflüssen. Dies gilt unmittelbar für Solarthermie, die durch die durch den Anlagenbetreiber nicht steuerbare Sonneneinstrahlung determiniert ist („dargebotsabhängig“). Mittelbar gilt dies mit

³⁹ Berechnung von Frontier Economics basierend auf UBA (2020a) & BMWi (2021a).

⁴⁰ BMWi (2019).

⁴¹ Siehe Fußnote 17.

zunehmendem Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung ebenso für elektrische Wärmepumpen. Auch die Nutzung von Abwärme aus der Industrie ist abhängig von der industriellen Produktion und somit nur eingeschränkt zuverlässig verfügbar.

Durch diese Eigenschaft kommt der (zentralen) KWK eine besondere Rolle bei der Gewährleistung der sicheren Wärmeversorgung in Wärmenetzen zu. Sie kann als steuerbare Absicherung („Back-up“) für dargebotsabhängige erneuerbare Wärmequellen und Abwärme in Wärmenetzen fungieren. Siehe hierzu auch Kapitel 2.4.

- **KWK entfaltet ihre Wirkung unter Nutzung der leistungsfähigen Gas- bzw. Fernwärmeinfrastruktur:** Generell wirkt eine Weiternutzung bestehender Fernwärme- und ggf. Gasleitungen (perspektivisch auch mit Wasserstoff) entlastend für die Transformation des Energiesystems. Die leistungsfähige Gas- und Fernwärmeinfrastruktur ist in der Lage mehr als 50 % der Heizsysteme in Deutschland mit Gas und Wärme zu versorgen (Abbildung 14). Die Weiternutzung auf Basis emissionsarmer Gase würde es erlauben, diese Versorgung aufrecht zu erhalten. Die Systemwirkungen von KWK in Gebäuden sind jedoch differenziert zu betrachten. Beispielsweise ist von Bedeutung, ob es sich um dezentrale, verbrauchsnahe KWK (Objekt- oder Quartiersversorgung) oder zentrale KWK (Fernwärme) handelt und welcher Brennstoff bisher verwendet wurde.
 - Einen wichtigen Vorteil weist die zentrale KWK in Bezug auf die potenzielle Umstellungsgeschwindigkeit auf emissionsarme Gase auf: Eine **Umstellung einer zentralen KWK-Anlage auf klimaneutrale Brennstoffe lässt sich deutlich schneller realisieren** als in eine Umstellung vieler verschiedener haushaltsindividueller Heizungen. Wird beispielsweise eine zentrale bisher kohlebefeuerte KWK-Anlage durch eine moderne wasserstoffbasierte Anlage ersetzt, sind sofort alle versorgten Haushalte klimaneutral versorgt.
- **KWK mit entlastender Wirkung auf das Stromsystem:** Bei den Auswirkungen auf das Stromsystem kommt der KWK eine entscheidende Bedeutung zu: Erstens reduziert eine Weiternutzung der bestehenden Gas- und Wärmenetze den Ausbaubedarf im Stromnetz und vermeidet damit Kosten und das mit einem zeitaufwendigen Zubau verbundene Risiko für die Umsetzung der Energiewende. Zweitens kann die KWK durch ihre flexible und steuerbare Erzeugung von Strom auch zu einer Stabilisierung der Stromresiduallast beitragen. Auch die neue Bundesregierung erkennt die Notwendigkeit von KWK-Anlagen zur Wahrung der Versorgungssicherheit im Stromsystem an.⁴²
 - **Dezentrale KWK-Systeme** können zudem durch eine Stromnetzeinspeisung auf unteren Netzebenen (z. B. im Verteilnetz) **netzentlastend** wirken und grundsätzlich Netzengpässe reduzieren. Denn der vor Ort erzeugte Strom wird in der Regel auch vor Ort verbraucht, und muss anders als bei

⁴² „Um den zügigen Zubau gesicherter Leistung anzureizen und den Atom- und Kohleausstieg abzusichern, werden wir in diesem Rahmen bestehende Instrumente evaluieren sowie wettbewerbliche und technologieoffene Kapazitätsmechanismen und Flexibilitäten prüfen. Dazu zählen u. a. [...] hocheffiziente Gaskraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung im Rahmen der Weiterentwicklung des entsprechenden Gesetzes, ein Innovationsprogramm, um H₂-ready Gaskraftwerke auch an Kohlekraftwerkstandorten anreizen zu können, [...]“, SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021), S. 61.

zentraler bzw. lastferner Stromerzeugung nicht erst in das Verteilnetz transportiert bzw. innerhalb des Verteilnetzes verteilt werden. Zum Teil kann der vor Ort erzeugte Strom sogar in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden und so beispielsweise in der Nachbarschaft der KWK-Anlage verbraucht werden. Auf diese Weise können dezentrale KWK-Anlagen aktiv zur Versorgung des zunehmenden Strombedarfs im Verteilnetz beitragen.

Der KWK-Beitrag ist hierbei besonders wertvoll, da Stromüberschüsse in KWK-Anlagen insbesondere an kalten Tagen mit hohem Wärmebedarf zu erwarten sind. Und genau dies sind die Tage, an welchem der Strombedarf in den Stromverteilnetzen durch elektrische Wärmepumpen (zusätzlich zum steigenden Bedarf für Elektromobilität im Verteilnetz) deutlich zunehmen wird. Und welche dementsprechend zukünftig für die Dimensionierung der Stromnetze – wie bereits heute für die Dimensionierung der Gasnetze – ausschlaggebend sein werden.

- **Fernwärme-KWK weitgehend ohne Endverbraucher-Investitionen und mit geringer Platzfordernis im Gebäude:** Grundsätzlich ist eine einheitliche Bewertung der Kosten und Nutzen für die Endanwender nicht möglich – aufgrund der Heterogenität der vorhandenen Heizsysteme, der Unterschiede in der lokalen Infrastruktur (z. B. Gas-, Nah- oder Fernwärmenetze), bei Bausubstanzen und Wohnungs- und Gebäudeklassen bzw. -größen. Generell lässt sich jedoch festhalten, dass hier ein Vorteil der zentralen KWK liegen kann, da im Haushalt des Endverbrauchers in der Regel keine größeren Investitionen zu tätigen sind.⁴³ Dagegen erfordern Wärmepumpen, dezentrale KWK in der Objekt- oder Quartiersversorgung und Brennstoffzellen hohe Anschaffungskosten. Dies gilt zum einen für die Heizung selbst, zum anderen sind in der Regel auch weitere Investitionen notwendig (beispielsweise Lüftungsanlage, Wärmedämmung, Fußbodenheizung).

Darüber hinaus erfordert ein Fernwärmeanschluss nur einen geringen Platzbedarf im Gebäude. Dies ist bei nahezu allen anderen Wärmeversorgungssystemen anders. So benötigen beispielsweise Öl- und Pelletheizungen neben dem Platz für die Heizung noch einen Lagerraum, Wärmepumpen benötigen in der Regel einen größeren Warmwassertank und einen Pufferspeicher sowie ggf. Platzbedarfe für erforderliche Schalldämmmaßnahmen.

2.3.3 Vergleich von Wärmeversorgungslösungen für Prozesswärme in der Industrie

Die Anforderungen an die Wärmeversorgung von Gebäuden unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher Gebäudetypen oder regionaler Faktoren bereits deutlich. Im Fall der Bereitstellung von Prozesswärme für die Industrie kommt erschwerend hinzu, dass manche Technologien nicht in der Lage sind, bestimmte, sich **aus dem Industrieprozess ergebende, Anforderungen** zu erfüllen. Zum Beispiel können in Industriebetrieben weitere Anforderungen, wie sehr hohe Vorlauftemperaturen oder eine hohe Bandbreite der Steuerbarkeit bei ausgeprägten Lastspitzen, auftreten.

⁴³ Die Fernwärme-Anschlusskosten können je Netzgebiet und Tarifstruktur jedoch stark variieren.

Wärmeversorgungslösungen für Industrieanwendungen

Industrielle Niedertemperaturprozesse umfassen den Temperaturbereich bis etwa 150°C.⁴⁴ Grundsätzlich sind in Bezug auf die Temperaturbereitstellung alle zuvor für die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung diskutierten Wärmeversorgungssysteme auch für **industrielle Niedertemperaturprozesse** geeignet. Es lassen sich die meisten der zuvor erläuterten Erkenntnisse aus dem Gebäudesektor übertragen. Ungeachtet dessen können jedoch unternehmens- oder gar prozessspezifische Rahmenbedingungen einzelne Anwendungen ausschließen, zum Beispiel wenn bestimmte Anforderungen an die Steuerbarkeit bestehen.

Viele Branchen benötigen jedoch deutlich höhere Temperaturen bis zu 500°C (**Mitteltemperaturprozesse**) und darüber hinaus (**Hochtemperaturprozesswärme**). Einige der im Gebäudebereich geeigneten (zukünftig klimaneutralen) Wärmequellen scheiden für Mittel- und Hochtemperaturprozesse aufgrund der **technisch begrenzten Temperaturhöhe** aus:

- Dies betrifft vor allem die Wärmepumpen, die zumeist nur Wärme unter 100°C bereitstellen können. Bei einzelnen Modellen (als sogenannte „Hochtemperatur-Wärmepumpen“ vermarktet) sind auch Temperaturen von bis zu 150°C möglich.
- Auch geothermische Wärmesysteme sind zumeist nicht in der Lage, Temperaturen über 100°C bereitzustellen. Ausnahmen sind hier nur tiefengeothermische Heizquellen, die teilweise über 200°C liefern könnten. Aufgrund geologischer Begebenheiten sind die potenziellen Standorte hierfür (zumindest in Deutschland) begrenzt und dürften nur zufällig mit den bestehenden Industriestandorten übereinstimmen.
- Auch die Solarthermie scheidet aufgrund der erreichbaren Temperaturen zumeist aus. Zwar sind technische Lösungen verfügbar, die Temperaturen über 200°C bereitstellen könnten. Allerdings erlaubt der Standort (in Deutschland) nur eine begrenzte Energiegewinnung aus Solarthermie bei zugleich hoher Saisonalität. Ein weiteres Problem aus industrieller Sicht ist, dass die Solarthermie die Wärme nicht konstant und verlässlich (bzw. steuerbar) bereitstellen kann. Dies gilt zwar auch für die Gebäudewärme, allerdings haben Anforderungen der Industrie an die Prozesswärme eine verhältnismäßig geringe zeitliche Toleranz.

Weitere Einschränkungen der möglichen Wärmeversorgungs-lösungen

Während die bisher angesprochenen Heizsysteme (Wärmepumpen, Geothermie, Solarthermie) aufgrund der Temperaturen nicht in Frage kommen, ist diese technische Einschränkung bei einigen anderen Technologien nicht gegeben. Diese sind aber aus anderen Gründen für viele Hochtemperatur-Anwendungen in der Industrie nicht (bzw. noch nicht) geeignet oder nur begrenzt ausbaufähig:

⁴⁴ Mit Bezug auf die Gebäudeversorgung bzw. Ansprüche von Haushalten würden solche Temperaturen bereits als Hochtemperatur klassifiziert werden. So werden bspw. Wärmepumpen, die Temperaturen im Bereich 65° bis ca. 100°C bereitstellen können, in der Gebäudeversorgung als Hochtemperatur-Wärmepumpen bezeichnet.

- So sind zum Beispiel Holzpellet- oder Hackschnitzelheizungen grundsätzlich in der Lage, auch sehr hohe Temperaturen bereit zu stellen, allerdings sind die Anlagendimensionen von Holz- sowie anderen Biomasseheizkraftwerken im Vergleich zu den konventionellen Anlagen der energieintensiven Industrie gering. Die meisten Biomasseanlagen werden im Bereich weniger MW dimensioniert. Dies liegt darin begründet, dass die Anlagen in der Regel auf ein lokales Biomasseangebot zurückgreifen, das bedingt durch verfügbare Anbau- bzw. Forstflächen begrenzt ist.⁴⁵ Gerade wenn Industrieanlagen in Ballungsräumen oder typischen Industrierevieren beheimatet sind, kann es zu Verfügbarkeitsengpässen kommen, zumal bei Biomasse teilweise auch eine Nutzungskonkurrenz mit nicht-energetischen Verwendungen gegeben ist (z. B. Nahrungsmittel oder Baustoffe). Schlussendlich werden viele Biomasseprojekte ohnehin als KWK-Anlage ausgelegt, sodass wir auf eine weitergehende gesonderte Betrachtung verzichten.
- Eine weitere Kategorie potenzieller Wärmesysteme besteht in Umrüstung von bisher ölbasierten Wärmequellen oder Industrieanlagen auf klimaneutrales, synthetisches Öl („Power-to-Liquids“ bzw. PtL). Ähnlich wie bei Gebäuden ist auch im Hochtemperaturbereich nicht mit einem massiven Zubau von Ölheizsystemen zu rechnen, selbst wenn der Brennstoff klimaneutral ist und die entsprechenden Temperaturen erreicht werden. Vor allem die politisch-gesellschaftliche Akzeptanz und unternehmensstrategischen Überlegungen bezüglich eines nachhaltigen Images dürfte hier den Einsatz von PtL auf einige Bestandsanlagen mit begrenzter Laufzeit beschränken. Bei Erneuerungen oder größeren Investitionsmaßnahmen dürften andere Heizsysteme vorgezogen werden. Darüber hinaus ist es auch möglich, dass nicht nur reine Wärmeerzeuger mit PtL betrieben werden, sondern solche Anlagen ebenfalls als KWK-Lösung errichtet werden können. Zumindest letztere Anlagen lassen sich daher auch in den folgenden Ausführungen zur klimaneutralen KWK integrieren.

Auch wenn einige der angeführten Wärmesysteme in bestimmten Fällen zur Anwendung kommen werden, sind sie aus aktueller Sicht keine Lösungen für eine flächendeckende Wärmewende im Hochtemperaturbereich. Hierfür erscheinen vielmehr die folgenden Wärmeversorgungssysteme geeignet:

- **KWK mit klimaneutralem Brennstoff** – In der Regel als dezentrale Lösung auf dem Firmengelände, zukünftig häufig in Kombination mit erneuerbaren oder strombasierten Elementen als sogenannte iKWK (innovative KWK);
- **(Hochtemperatur-)Brennstoffzelle** (analog zum Haushaltsbereich; ebenfalls eine KWK-Technologie); und
- **Direktelektrische Wärme** (Power-to-Heat) – Hierunter lassen sich verschiedene strombasierte Prozesse fassen, bei denen ein Wärmemedium (Dampf, Wasser) erhitzt wird (Elektroden- oder Elektronenkessel) oder die Wärme direkt umgewandelt bzw. abgegeben wird (z. B. Lichtbogen oder Infrarot).

Bei der Bewertung der industriellen Wärmequellen wird auf die gleichen Kriterien zurückgegriffen, wie bei den Gebäuden. Lediglich in der Kategorie „Kosten/Nutzen

⁴⁵ Vgl. Quaschnig (2020), S. 313.

für den Anwender“ sind einige Aspekte wie Bedienkomfort oder Aufwertung der Wohnimmobilie nicht von Bedeutung.

KWK ist eine der wenigen Technologien, die Hochtemperatur bereitstellen kann

Die Vorteile der KWK in der Industrie sind dabei grundsätzlich ähnlich gelagert wie im Haushaltsbereich. Neben dem breiten Anwendungsbereich und der hohen Brennstoffeffizienz durch hohe Wirkungsgrade, sind v. a. die Auswirkungen auf das Wärme- und das Stromsystem von Bedeutung.

Dies wird gerade im Vergleich zur Power-to-Heat-Technologie deutlich. Power-to-Heat bewirkt einen starken Anstieg des Strombedarfs, der zudem auch mit zeitlichen und örtlichen Lastspitzen verbunden sein kann. Hierfür sind hohe zusätzliche Investitionen in den Stromnetzausbau und -verstärkung notwendig. Zusammen mit den hohen Investitionen auf betrieblicher (Technologieumstellung, Ausbau Stromanschlusskapazitäten) und volkswirtschaftlicher Ebene (Netzausbaukosten) und ebenfalls hohen laufenden Strombezugskosten, ist Power-to-Heat eine zwar technisch geeignete, aber doch äußerst teure Alternative für die Industrie.

Tabelle 1 fasst die wesentlichen Ergebnisse für den Hochtemperaturbereich zusammen. Die meisten Aussagen lassen sich auch auf Mitteltemperaturprozesse übertragen, ggf. sind einige Aspekte (beispielsweise bei den Systemauswirkungen oder Kosten) weniger stark ausgeprägt. Detaillierte Steckbriefe zu den einzelnen Technologien finden sich in Anhang A.

Tabelle 1 Bewertung der Wärmeversorgungssysteme für Industrie im Überblick

Wärmeversorgungs-lösung	Anwendungsmöglichkeiten	Wirkungsgrad ¹	Steuerbarkeit	Systemauswirkung	Auswirkung auf Stromsystem	Kosten/Nutzen für Anwender ¹
KWK (klimaneutraler Brennstoff)	+ Potenzial v.a. für Hochtemperaturprozesse	+ Sehr hoher Gesamtwirkungsgrad	0 Output steuerbar, Strom-/Wärmeabhängigkeit	+ Brennstoffumrüstung möglich; Nutzung Gasinfrastruktur	+ Entlastend bei flexibler Fahrweise	0 Individuelle Kostensituation
Brennstoffzelle	0 Technisch gut geeignet für hohe Temperaturanforderungen; noch keine Standardlösungen am Markt verfügbar	+ Sehr hoher Gesamtwirkungsgrad, höherer Stromanteil	0 Output eher Grundlast	0 Erdgasinfrastruktur tlw. weiter nutzbar, ggf. zusätzliche Infrastruktur notwendig	+ Entlastend durch dezentrale Stromerzeugung	0 Sehr hohe Kosten für Anschaffung (Preisdegression erwartet)
Direktelektrische Wärme (Power-to-Heat)	+ Alle Temperaturbereiche und vielfältige Anwendungsbereiche	0 Hoher Wirkungsgrad, aber reiner Strominput	+ Anlage sehr flexibel einsetzbar	- Zusätzlich Bedarf für Stromnetzentwicklung und gesicherte Leistung	- Sehr hoher Strombedarf mit ggf. starken Lastspitzen	- Individuelle aber i.d.R. hohe Anschaffungskosten und hohe Stromkosten

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: ¹Relative Bewertung zwischen den Technologien, keine absolute Bewertung. Eine ausführliche Beschreibung der jeweiligen Bewertungen kann Anhang A entnommen werden.

2.4 In einem zunehmend durch Wind- und Sonnenenergie geprägten System muss und kann KWK zukünftig flexibler eingesetzt werden

Im Wärme- sowie auch im Stromsystem werden zunehmend dargebotsabhängige Erzeugungstechnologien eingesetzt. Diese Stromerzeugung aus Wind und Sonne ist nur in eine Richtung steuerbar oder bieten nur sehr eingeschränkte Flexibilität, zum Beispiel durch Abregelung ganzer Anlagen. Um die jeweiligen Bedarfe der Wärme- und Stromerzeugung zu decken, bedarf es daher technischer Ergänzungen zu dieser dargebotsabhängigen Erzeugung.

KWK-Anlagen sind steuerbar und geeignet für Technologie-Kombinationen

KWK-Anlagen sind hochflexibel und in weiten Grenzen steuerbar. Das heißt, dass die Erzeugung der KWK-Anlage angepasst werden kann, um eine bestimmte Wärme- oder Stromleistung zur Verfügung zu stellen. Neben der Ergänzung von dargebotsabhängigen Stromerzeugungstechnologien (Kapitel 3), können KWK-Anlagen auch Wärmeerzeugungstechnologien ergänzen, die gewissen Einschränkungen unterliegen. Zu den möglichen Einsatzfeldern zählen:

- **Solarthermieanlagen** sind eine dargebotsabhängige Erzeugungstechnologie. Das heißt, dass die Erzeugung durch Witterungseinflüsse bestimmt ist und nicht flexibel dem Bedarf angepasst werden kann. Eine ergänzende KWK-Anlage kann jedoch die notwendige Steuerbarkeit bieten, um eine fluktuierende Nachfrage zu decken. So kann zum Beispiel der Wärmebedarf einzelner Objekte oder für die Nah- und Fernwärmeversorgung mit Solarthermie in Kombination mit KWK-Anlagen bedient werden.
- Ähnliches gilt auch für die **tiefe Geothermie**. Diese ist zwar nicht witterungsabhängig und geothermische Anlagen sind grundsätzlich auch steuerbar, in der

Praxis sind diese Anlagen aber auf einen bandförmigen Volllastbetrieb zur Grundlastsicherung (was die meisten anderen erneuerbaren Energien eben nicht leisten können) ausgelegt. Die Anlagen werden in Deutschland häufig mit über 8.000 Benutzungsstunden betrieben.⁴⁶ Dies bedeutet, dass sie in Zeiten hoher Nachfrage keine zusätzliche Wärme mehr bereitstellen können. Analog zur Solarthermie kann auch hier eine ergänzende KWK-Anlage die Flexibilität der Anlagenkonfiguration steigern.

- Die Kombination von **(Groß-)Wärmepumpen und KWK-Anlagen** kann unterschiedliche Zwecke erfüllen:
 - Wärmepumpen benötigen Elektrizität zur Erzeugung von Wärme und erhöhen damit die Anforderungen an die Stromerzeugung (Energienmenge, Spitzenlast) und Netzinfrastruktur (Transportkapazität). Durch eine Kombination mit KWK-Anlagen erhöht sich die Systemdienlichkeit der Wärmeversorgungslösung. So kann der Strombedarf flexibel reduziert werden und durch die KWK-Anlage sogar bei Bedarf netz- und systemstützend Strom erzeugt werden. Die Wärmeversorgung ist zu jeder Zeit über die Wärmepumpe oder KWK-Anlage gewährleistet.
 - Die Wärmeenergieleistung von Wärmepumpen variiert mit der zugeführten Umgebungswärme (bzw. dem Temperatur-Differenzial), zum Beispiel aus Luft, Erde, Wasser (Fluss) oder Abwärme. Eine Kombination mit einer KWK-Anlage erhöht dagegen die Resilienz der Wärmeversorgung und gleicht eine temporär geringere Leistungsfähigkeit der Wärmepumpe aus.
- Die Kombination mit **PtH-Anlagen** ermöglicht eine hohe Systemdienlichkeit der Wärmeversorgungslösung. Während die PtH-Anlage in Phasen von Überschussstrom Wärme erzeugt (und Strom aus dem Netz bezieht), kann die KWK-Anlage in Phasen von Strombedarf (positiver Residuallast) betrieben werden. Neben dem systemdienlichen Einsatz kann die PtH- und KWK-Anlage-Kombination auch flexibel genutzt werden, um auch netzdienlich Strom zu beziehen oder zu erzeugen und damit systemstabilisierend zu wirken.

Die folgende Fallstudie zeigt ein Praxisbeispiel für ein iKWK-Projekt, bei welchem eine Groß-Wärmepumpe und ein Elektrokessel um zwei BHKW ergänzt werden.

Fallstudie : Kombination aus Wärmepumpe und KWK für die Fernwärmeversorgung

⁴⁶ Siehe bspw. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/g/grundlastfaehig.html>.

Das Projekt

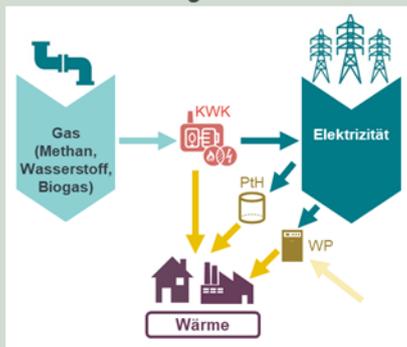


- Kombination aus zwei **BHKW** (je ca. 4,5 MWth) mit einem **Elektrokessel** und einer **Groß-Wärmepumpe**
 - Klimaneutrale **Wärmequelle ist Abwasser einer Kläranlage**: Die Wärmepumpen entzieht dem 8°C bis 25°C warmen Abwasser bis zu 5°C
 - Einspeisung in das Fernwärmenetz
 - Zusätzlich befinden sich an einem Standort noch weitere konventionelle BHKW
- iKWK-Projekt der Stadtwerke Duisburg mit geplanter Fertigstellung 2024
 - Zuschlag in der iKWK-Ausschreibung Sommer 2021

Die Ziele



- **Emissionsärmere Wärmeerzeugung**
- **Verwendung der Abwärme** der Kläranlage
 - Reduzierte Wärmeeinleitung in den Rhein
- BHKW als „Residuallastdeckung“: Wärmepumpe benötigt mindestens 12°C warmes Abwasser und kann nicht immer (voll) arbeiten



The diagram illustrates the energy conversion process. On the left, a box labeled 'Gas (Methan, Wasserstoff, Biogas)' has an arrow pointing to a 'KWK' (combined cycle gas turbine) unit. From the KWK, two arrows branch out: one to 'Elektrizität' (electricity) represented by power lines, and another to 'Wärme' (heat) represented by a house and a factory. A 'PtH' (power-to-heat) unit is shown with an arrow pointing to the 'Wärme' output. A 'WP' (heat pump) unit is shown with an arrow pointing to the 'Wärme' output, and another arrow pointing from the 'Wärme' output back to the 'WP', indicating a feedback loop or specific heat exchange process.

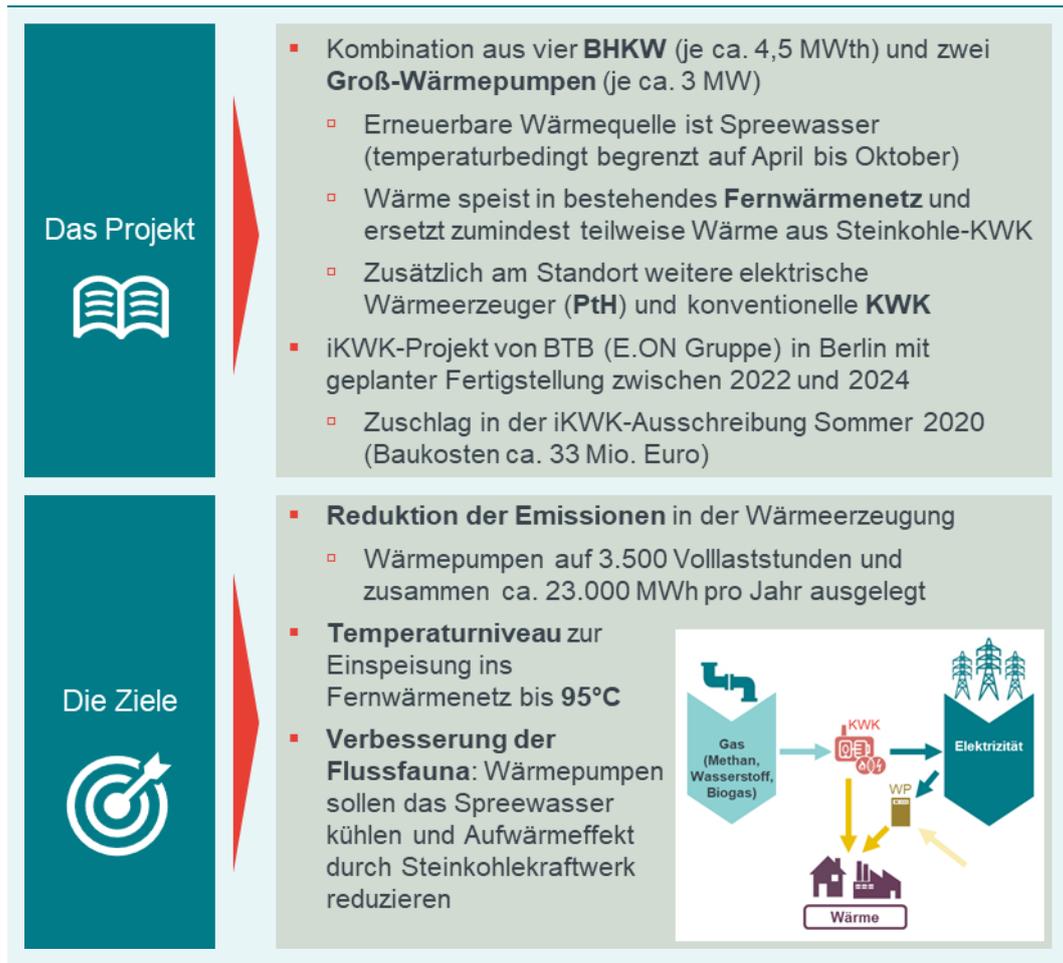
KWK-Anlagen können die Defossilisierung effektiv unterstützen

Durch den kombinierten Einsatz von KWK-Anlagen mit weiteren Technologien können unterschiedliche Zwecke erfüllt werden, wie zum Beispiel:

- Die **Wärmeversorgung beschleunigt defossilisieren**, zum Beispiel in Kombination mit Solar- oder Geothermie;
- das Stromsystem durch den **systemdienlichen und gegebenenfalls netzdienlichen Einsatz** stützen, zum Beispiel in Kombination mit Wärmepumpen; und
- erzeugten Strom aus erneuerbaren Technologien besser nutzen und deren **Abregelung vermeiden**, zum Beispiel in Kombination mit PtH.

Die Steuerbarkeit der Strom- und Wärmeerzeugung ist also eine wertvolle Eigenschaft der KWK. Die folgende Fallstudie illustriert exemplarisch die Möglichkeit eines Ersatzes von Steinkohle-KWK durch eine Kombination aus Wärmepumpen und mit erneuerbaren und/oder klimaneutralen Brennstoffen befeuerten KWK.

Fallstudie: Kombination aus KWK und Wärmepumpen ersetzen Steinkohle-KWK



Flexibler Einsatz der KWK-Anlagen verändert die betriebswirtschaftliche Perspektive

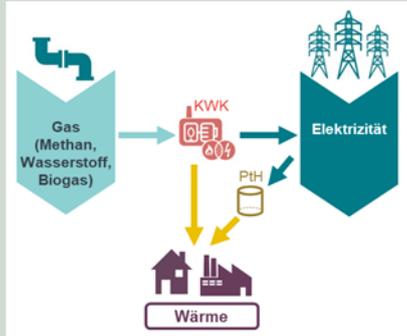
Der Einsatz von KWK-Anlagen in einer zunehmend (Strom-)systemdienlichen Fahrweise und die Kombination mit weiteren Erzeugungstechnologien hat Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen:

- Eine stromgeführte Fahrweise oder „ergänzende“ Rolle in Kombination mit weiteren Technologien führt zu **geringeren Volllaststunden** im Betrieb der KWK-Anlage gegenüber einem Grundlast-orientierten Betrieb.
- **Wärmespeicher** ermöglichen die zeitliche Entkopplung der Wärmeerzeugung vom Wärmeverbrauch durch Endverbraucher (z. B. Industrie oder Haushalte). Dadurch erlauben sie zum Beispiel KWK- oder PtH-Anlagen eine stromgeführte Betriebsweise und somit eine Wärmeerzeugung, die vom Wärmebedarf zum Teil zeitlich entkoppelt ist. Die Relevanz von Wärmespeichern, die mit den Wärmeerzeugungstechnologien kombiniert werden, steigt somit mit einem flexibleren Betrieb der KWK-Anlagen. Der Bau von zusätzlichen oder größeren Wärmespeichern in Ergänzung der KWK-Anlage erfordert also zusätzliche Investitionen zur Errichtung der Wärmeversorgung. Ungeachtet dessen fallen die

Kosten der Wärmespeicherung deutlich geringer aus als die einer Stromspeicherung mittels Batterien.⁴⁷

⁴⁷ Vgl. hierzu ausführlicher BFE (2021).

Fallstudie : Kombination aus KWK & PtH in zur Wärmeversorgung von Haushalten und Gewerbe

<p>Das Projekt</p> 	<ul style="list-style-type: none">▪ Eine PtH-Anlage wird in Kombination mit Blockheizkraftwerken zur Fernwärmeversorgung in Hamburg Billstedt genutzt<ul style="list-style-type: none">▫ Die PtH-Anlage (5 MW) ergänzt zwei BHKW von Getec zur Versorgung von ca. 7.000 Wohnungen und Gewerbeeinheiten▪ 50Hertz finanziert die PtH-Anlage mit Kosten in Höhe von etwa 1,2 Mio. €<ul style="list-style-type: none">▫ Die Beteiligung von 50Hertz ist durch eine Änderung mit EnWG (§13 Abs. 6a EnWG) im Norden Deutschlands („Netzausbaugebiet“) möglich▫ 50Hertz erhält volles Zugriffsrecht auf die PtH-Anlage
<p>Die Ziele</p> 	<ul style="list-style-type: none">▪ Die Nutzung von „Überschussstrom“ aus der EE-Erzeugung: Vermeidung der Abregelung und Entschädigungszahlungen▪ Erwartet werden ca. 1.500 VLH der PtH-Anlage▪ Einsparungen von ca. 9.000 MWh Erdgas pro Jahr 

Die KWK-Anlagen in Deutschland werden bisher zum Teil wärmegeführt betrieben

Viele bestehende KWK-Anlagen in Deutschland werden bislang wärmegeführt betrieben. Dieses Konzept stammt jedoch aus der fossil-dominierten Energieversorgung.⁴⁸ In diesem Rahmen erhielten geförderte KWK-Anlagen (Förderung der Stromerzeugung durch „KWK-Zuschlag“) den Anreiz, eine hohe Anzahl förderfähiger Vollbenutzungsstunden zu erreichen. Um eine hohe Anzahl der Vollbenutzungsstunden und die maximale Fördermenge zu erreichen, wurden viele KWK-Anlagen in der Vergangenheit so dimensioniert (thermische oder elektrische Leistung), dass sie als „Grundlast“ eingesetzt und möglichst viel betrieben werden.

Mit dem KWK-Gesetz 2020 wurde eine jährliche Begrenzung eingeführt, sodass die Förderung nur für eine maximale Anzahl der Vollbenutzungsstunden pro Jahr

⁴⁸ Mit einer wärmegeführten Fahrweise wurde in der fossil-dominierten Energieversorgung durch hohe Vollbenutzungsstunden das Maximum an Umwelt- und Klimanutzen erreicht, sodass diese Fahrweise dementsprechend beanreizt bzw. gefördert wurde. Durch den Wandel in ein Energiesystem, das von erneuerbaren Energien geprägt ist, ist die Betriebsweise der KWK anzupassen, zum Beispiel indem die Fahrweise flexibel an die nach Einsatz von Energie aus Wind und Sonne noch verbleibende Strom- und Wärmelast („Residuallast“) angepasst wird.

gilt (fallend von 5.000 auf 3.500 Vollbenutzungsstunden in 2025). Der neue KWKG-Regelungsvorschlag im Osterpaket sieht vor, das zukünftig die förderfähigen jährlichen Vollbenutzungsstunden auf 2.500 h/a bis 2030 weiter abgesenkt werden sollen.⁴⁹ Zur Bereitstellung eines gegebenen Strom- und Wärmebedarfs bei niedrigeren Volllaststunden geht eine höhere KWK-Leistung (Anlagen-Dimensionierung) einher. Durch die Reduktion der geförderten Vollbenutzungsstunden wird somit ein Anreiz zu einer flexibleren und stärker stromgeführten Anlagenfahrweise gesetzt.⁵⁰

Das Förderregime hat also einen erheblichen Einfluss auf die Fahrweise der KWK-Anlagen. Durch die Defossilisierung und den verstärkten Einsatz von dargebotsabhängigen erneuerbaren Energiequellen wird es jedoch zunehmend wichtig, die KWK-Anlagen als *steuerbare* Leistungen in die Wärme- und Stromsysteme einzubinden. Durch ihre Steuerbarkeit können KWK-Anlagen die lokalen oder systemweiten Schwankungen in der Einspeisung von anderen, dargebotsabhängigen Wärmeerzeugungs-Technologien, wie zum Beispiel Solarthermie, Geothermie oder Wärmepumpen ausgleichen und im Stromsystem system- und netzdienliche Leistung erbringen. Um die Steuerbarkeit für die Wärme- und Stromsektoren zu nutzen, muss das KWK-Förderregime allerdings weiterentwickelt werden (siehe hierzu Kapitel 5).

⁴⁹ BMK (2022b).

⁵⁰ Vgl. hierzu bspw. <https://www.bkwb.de/auslegung-kwk/>.

3 KWK-POTENZIAL IN DER STROMVERSORGUNG

Auch dem Stromsektor kommt eine Schlüsselrolle bei der Klimazielerreichung zu. Im folgenden Kapitel zur Rolle der KWK in der Stromversorgung untersuchen wir die Herausforderungen und Implikationen der Transformation der Stromversorgung zur Klimaneutralität. Wir betrachten insbesondere die Potenziale der KWK, um zum Erreichen der Klimaneutralität im Stromsektor beizutragen.

Einleitend fassen wir den möglichen Beitrag von KWK für Klimaneutralität in der Stromversorgung zusammen (Kapitel 3.1).

Anschließend...

- ... formulieren wir die **Anforderungen an die Transformation zur Klimaneutralität** in der Stromversorgung (Kapitel 3.2);
- ... stellen wir die Auswirkungen des **Ausstiegs aus der Verstromung von Kohle und Kernenergie** auf die Kapazitäten zur Stromerzeugung, unter Berücksichtigung des zunehmenden Strombedarfs, dar (Kapitel 3.3);
- ... erläutern wir die **zukünftige Rolle der (wasserstofffähigen) Gas-Kraftwerke** im deutschen Stromsystem (Kapitel 3.4); und
- ... untersuchen wir die **Einsatzmöglichkeiten der KWK zur gleichzeitigen, systemdienlichen Bereitstellung von Wärme und Strom** (Kapitel 3.5).

3.1 Zusammenfassung

Strom kommt eine besondere Rolle bei einer klimaneutralen Energieversorgung zu: Einerseits werden zukünftig viele Anwendungen – vor allem – in der Mobilität, der Wärmeversorgung und der Industrie elektrifiziert werden, um diese zu defossilisieren. Andererseits wird der bisherige Stromverbrauch noch zu erheblichen Teilen durch fossile Energien versorgt. Bis 2030 müssen die Emissionen im Stromsektor um 61 % gegenüber 2020 gesenkt werden, bis spätestens 2045 muss die Stromversorgung klimaneutral sein.

Die KWK kann hierbei eine entscheidende Rolle spielen. Bereits heute beträgt die Netto-Stromerzeugung aus KWK über 110 TWh/a (2019) und deckt damit etwa 22 % der Stromerzeugung. Nachfolgend fassen wir die Schlussfolgerungen zur Rolle der KWK für eine klimaneutrale Stromversorgung zusammen. Dabei spiegeln wir jeweils, inwiefern KWK die in Kapitel 1 identifizierten Anforderungen im Ziel-dreieck von Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit adressieren kann.

KWK kann wesentlich zum [Klimaschutz](#) beitragen

Die Nutzung von KWK-Anlagen kann wesentlich zum Klimaschutz beitragen:

- **Reduktion des Primärenergieverbrauchs** – Wie bereits in Kapitel 2 erläutert wird der eingesetzte Brennstoff durch die gleichzeitige Erzeugung von Strom

und Wärme effizient genutzt. Dadurch reduziert sich der Primärenergieverbrauch gegenüber einer getrennten Strom- und Wärmeerzeugung signifikant.

- **KWK ermöglicht Kohle- und Kernenergieausstieg:** Durch den Ersatz von Kohle-KWK durch Gas-KWK an bestehenden Standorten können bereits kurz- und mittelfristig erhebliche Emissionsminderungen erreicht werden. Zusätzlich erfordert der Ausstieg aus der Kernkraft und der Braun- und Steinkohle-basierter Stromerzeugung auch zukünftig sicher verfügbare und steuerbare Kraftwerke. Diese sind essenziell, um trotz steigenden Strombedarfs in Folge der Elektrifizierung von Mobilitäts-, Wärme- und Industrieanwendungen und zunehmend dargebotsabhängiger Stromerzeugung aus Wind und Sonne jederzeit zuverlässig den Strombedarf decken zu können. Gasbasierte KWK, welche zunehmend mit Biomethan und Wasserstoff betrieben werden, können diese Sicherheit bieten und somit die Integration von Wind- und Solarstromerzeugung und den Ausstieg aus Kohle und Kernenergie unterstützen. KWK-Anlagen sind je nach Anwendungsfall besonders geeignet, zum Beispiel durch eine effiziente Brennstoffnutzung, d. h. zukünftig Wasserstoff und erneuerbare Gase, und die damit verbundene Nutzung des Wärme-Outputs.

KWK ist wesentlich für den Erhalt der Versorgungssicherheit

Neben dem Beitrag zum Klimaschutz ist KWK wichtig für die Sicherheit der Stromversorgung:

- **Sicherstellung flexibler und zuverlässiger Erzeugung & Speicherung** – Bestehende und neue KWK-Anlagen können wie zuvor ausgeführt zur Bereitstellung gesicherter Stromerzeugungsleistung beizutragen.
- **Sicherstellung leistungsfähiger Netze** – KWK kann zudem Abhilfe beim erheblichen Ausbaubedarf der Stromübertragungs- und -verteilnetze schaffen:
 - Das **Stromübertragungsnetz** wird durch KWK dadurch entlastet, dass das vorhandene Gastransportnetz weiter genutzt werden kann (allerdings bei erhöhter Wasserstoffkompatibilität, siehe Kapitel 4). KWK-Anlagen sind per Definition in der Nähe des Wärmeverbrauchs angesiedelt, also anders als insbesondere Windanlagen, die im Norden Deutschlands konzentriert sind, befinden sich KWK-Anlagen schwerpunktmäßig in den Energieverbrauchscentren im Westen und Süden Deutschlands. Entsprechend bieten KWK-Anlagen die Möglichkeit, Strom dort zu produzieren, wo zunehmend Stromknappheit durch Stromnetzengpässe droht. Hierdurch können KWK-Anlagen zu einer Entlastung des Stromsystems beitragen.
 - Die **Stromverteilnetze** werden durch KWK entlastet, indem der Gastransport bzw. die Gasverteilung bis zur KWK-Anlage über Gasnetze erfolgt, und dann...
 - ... im Fall einer „zentralen“ **KWK-Anlage** die erzeugte Wärme über **(Fern-)Wärmenetze** an die Verbraucher geliefert wird. Für diese Verbraucher wird entsprechend **keine für die Wärmeversorgung dimensionierte Stromnetzanbindung benötigt**.

Der in der KWK-Anlage erzeugte Strom muss weiterhin zum Endverbraucher transportiert werden, allerdings aufgrund der Lastnähe der

KWK-Anlagen in der Regel nur noch über vergleichsweise geringe Entfernungen.

- ... im Fall einer Industrie-KWK-Anlage oder einer **dezentralen KWK-Anlage** zur Quartiers- oder Objektversorgung die Wärme direkt vor Ort erzeugt und verbraucht wird. Auch für diese Verbraucher wird entsprechend **keine auf Wärmeversorgung ausgerichtete Stromnetzanbindung benötigt**.

Zudem wird der vor Ort erzeugte Strom in der Regel auch vor Ort verbraucht und muss, anders als bei zentraler bzw. lastferner Stromerzeugung, nicht erst über das Stromübertragungsnetz transportiert bzw. innerhalb der Stromverteilnetze verteilt werden. Zum Teil kann der vor Ort erzeugte Strom sogar in das öffentliche Stromnetz oder in eine elektrische Kundenanlage im Quartier eingespeist werden, und so beispielsweise in der Nachbarschaft der KWK-Anlage verbraucht werden. Auf diese Weise können dezentrale KWK-Anlagen aktiv zur Versorgung des zunehmenden Strombedarfs im Verteilnetz beitragen.

KWK kann die Akzeptanz der Wärmewende steigern

Der geringere Brennstoffverbrauch durch gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung führt zu Kosteneinsparungen – insbesondere vor dem Hintergrund hoher Gaspreise. Der durch KWK verringerte Stromnetzausbau kann neben weiteren Kosteneinsparungen zudem die Akzeptanz vor Ort erhöhen, womit ein wesentliches Hemmnis einer erfolgreichen Wärme- und Energiewende adressiert wird.

Abbildung 18 Zusammenfassung möglicher Beiträge der KWK für die zukünftige Stromversorgung



Quelle: Frontier Economics

3.2 Anforderungen an die Transformation zur Klimaneutralität in der Stromversorgung

Strom kommt eine besondere Rolle bei einer klimaneutralen Energieversorgung zu: Einerseits werden zukünftig viele Anwendungen – vor allem – in der Mobilität, der Wärmeversorgung und der Industrie elektrifiziert werden, um diese zu defossilisieren. Andererseits wird heute der Stromverbrauch noch zu erheblichen Teilen durch fossile Energien versorgt. Entsprechend müssen die Emissionen der Energiewirtschaft – welche im Wesentlichen durch Stromerzeugung verursacht sind – gemäß Klimaschutzgesetz bis 2030 um mindestens 61 % gegenüber 2020 gesenkt

werden, und damit stärker als in allen anderen Sektoren. Bis spätestens 2045 muss die Stromversorgung klimaneutral sein.

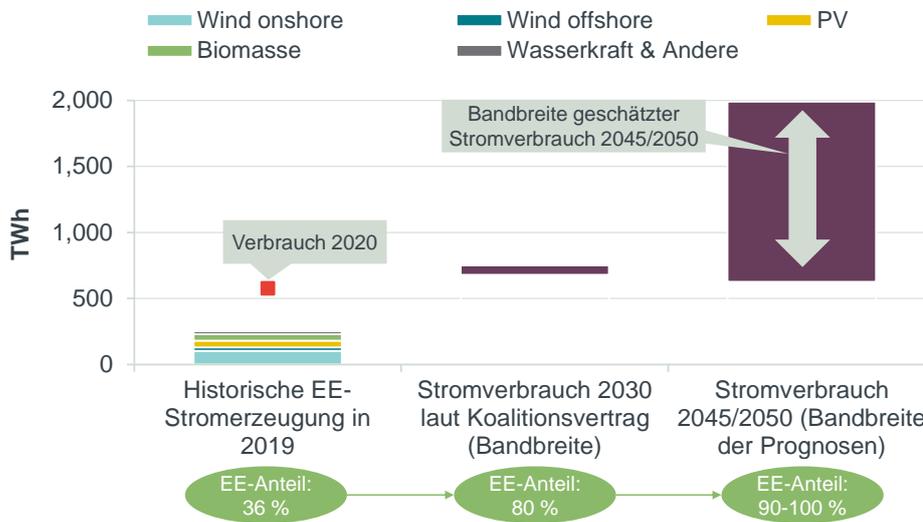
Hieraus ergeben sich besondere Anforderungen an die Stromversorgung. Die grundlegenden Anforderungen an eine klimaneutrale Energieversorgung sind in Kapitel 1 beschrieben. Nachfolgend seien die zentralen Anforderungen für die Stromversorgung explizit hervorgehoben:

- **Ausstieg aus der Verbrennung fossiler Energieträger** – Verbleibender Energiebedarf muss zunehmend und letztlich vollständig von fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Erdgas auf klimaneutrale Energieträger umgestellt werden. Hierzu sieht der Koalitionsvertrag einen beschleunigten Ausstieg aus der Kohleverstromung vor. Demnach soll der Ausstieg „idealerweise“ bis 2030 umgesetzt werden.⁵¹ Gemeinsam mit den letzten im Laufe des Jahres 2022 vom Netz gehenden Kernkraftwerken werden in Summe etwa 43 GW Kernenergie- und Kohlekapazitäten den Strommarkt bis 2030 verlassen. Dies entspricht etwa 19 % der gesamten verfügbaren Erzeugungsleistung (2021: 222 GW) bzw. 44 % der verfügbaren steuerbaren Erzeugungsleistung (2021: 98 GW).⁵²
- **Steigender Stromverbrauch durch Elektrifizierung** – Trotz zunehmender Energieeffizienzmaßnahmen ist davon auszugehen, dass die Elektrifizierung von Anwendungen in den Sektoren Mobilität, Wärme und Industrie und insbesondere auch die Digitalisierung aller Lebensbereiche zu steigendem Stromverbrauch führen wird. Der Koalitionsvertrag geht von einem Anstieg des Bruttostrombedarfs von etwa 577 TWh in 2019 auf 680 TWh bis 750 TWh in 2030 aus. Zur Erreichung von Klimaneutralität bis 2045 könnte laut verschiedenen Prognosen der Strombedarf weiterhin steigen (im Extremfall mit maximaler Elektrifizierung auf fast 2.000 TWh/a) (Abbildung 19).
- **Ausbau erneuerbarer Energien** – Der Ausstieg aus fossiler Stromerzeugung bei gleichzeitiger Elektrifizierung neuer Anwendungen erfordert einen erheblichen Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Daraus ergibt sich zugleich ein erheblicher Stromnetzentwicklungsbedarf, der zu weiteren Netzausbau- und -verstärkungsmaßnahmen führen wird, die in ihrem Umfang derzeit noch nicht vollständig bemessen sind. Bis 2045 müssten sich die erneuerbaren Stromerzeugungsmengen gemäß der o.g. Verbrauchsprognosen um den Faktor 3 bis 10 vervielfachen, um den Strombedarf (fast) vollständig aus erneuerbaren Energien zu decken.

⁵¹ SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021), Seite 58. Dies würde bedeuten, dass etwa 34 GW steuerbare Kraftwerkskapazitäten aus Braun- und Steinkohle bis 2030 vom Netz gehen. Zusätzlich werden bis Ende 2022 etwa 8 GW Kapazität aus Kernenergie abgeschaltet.⁵¹

⁵² Stand: Dezember 2021. Die steuerbare Erzeugungsleistung umfasst Kapazitäten aus Kernenergie, Braunkohle, Steinkohle, Erdgas, Mineralölprodukten, Pumpspeicher, sonstige nicht erneuerbare Energieträger und Biomasse.

Abbildung 19 Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Stromverbrauchsprognosen



Quelle: Frontier Economics basierend auf BMWi (2021a) und verschiedenen Studien zur Prognose des Stromverbrauchs. Die Langfristprognose wurde auf bis 2020 erstellten Studien i. d. R. für das Jahr 2050 vorgenommen, in ganz aktuellen Studien wurde im Einklang mit dem neuen Klimaneutralitätsziel der Bundesregierung auf 2045 (statt 2050) fokussiert.

Hinweis: Das untere Ende der Bandbreite des geschätzten Stromverbrauchs ergibt sich aus Prognos & Boston Consulting Group (2018) mit 626 TWh in 2050 in einem 95%-Klimapfad. Das obere Ende ist abgeleitet aus Enervis (2017) mit 1.991 TWh in 2050 in einem Szenario mit maximaler Elektrifizierung. Die aktuellsten Langfristszenarien für die Bundesregierung gehen von einem Strombedarf in 2050 zwischen 800 und 1000 TWh aus (Fraunhofer ISI et al. (2021), die im September 2021 erschienene Leitstudie 2 der dena [dena (2021a)] geht von einer Stromnachfrage von 910 TWh in 2045 aus.

Bis 2030 hat die Bundesregierung das Ziel eines Anteils erneuerbarer Energien an der (steigenden) Bruttostromnachfrage von 80 % ausgerufen. Bis 2035 soll gemäß aktuellem Referentenentwurf für die EEG-Novelle 2023 ein Anteil erneuerbarer Energien von nahezu 100 % erreicht werden. Konkret soll...

- ... die elektrische Leistung von Photovoltaik bereits bis 2030 auf 215 GW gesteigert und somit gegenüber heute mehr als verdreifacht werden.
- ... für Wind auf See ein Ausbau von 30 GW bis 2030 und 70 GW bis 2045 ab.⁵³
- ... die Kapazität von Windanlagen an Land soll bis 2030 auf 115 GW gesteigert werden, was – unter Berücksichtigung des Rückbaus älterer Anlagen – einer Verdopplung der derzeitigen Leistung entspricht.⁵⁴
- **Erhöhung der Spitzenlast** –Eine zunehmende Elektrifizierung der Wärmeversorgung von Gebäuden und Industrieprozessen wird zu einem Anstieg der Spitzenlast führen, auf welche (steuerbare) Stromerzeugungskapazitäten und Stromnetze ausgelegt werden müssen. Die Nachfragespitze betrug in 2019 in Deutschland ca. 77 GW.⁵⁵ Bis 2030 steigt diese unter konservativen Annahmen um mindestens 12 GW, im Extremfall sogar um bis zu 37 GW. Bis 2040 setzt sich dieser Trend voraussichtlich fort, sodass durch Wärmepumpen und E-

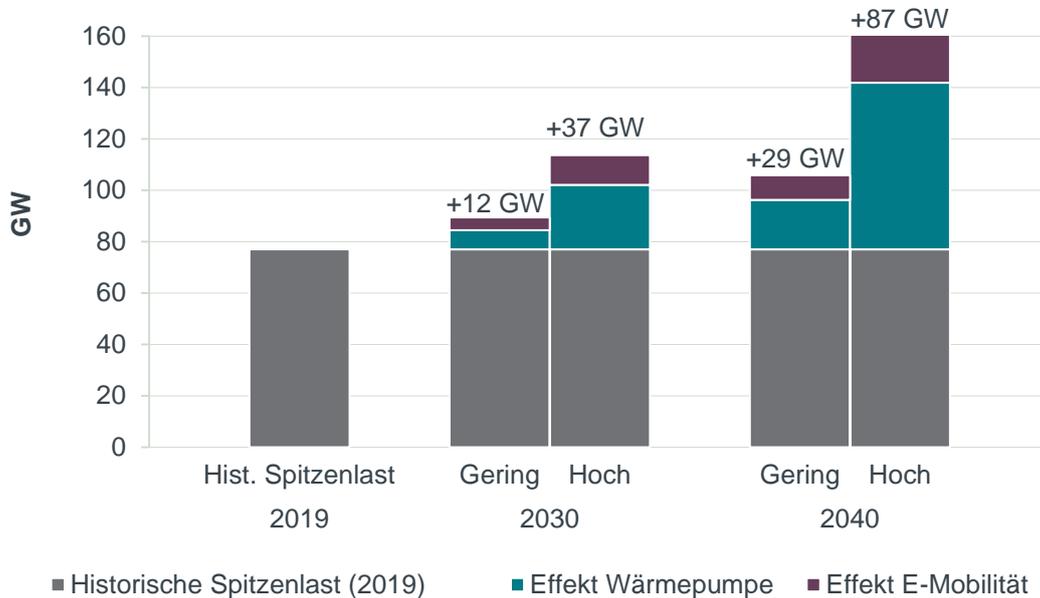
⁵³ Vgl. SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021), S. 44f.

⁵⁴ BMWK (2022b)

⁵⁵ EW (2021b). Im Winter 2012/2013 betrug die Höchstbelastung rund 81 GW (<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/spitzenlast-614922>).

Mobilität eine zusätzliche Nachfrage von 29 GW bis zu 87 GW entstehen könnte (Abbildung 20).

Abbildung 20 Historische Spitzenlast und potenzielle zusätzliche Spitzennachfrage durch Wärmepumpen und E-Mobilität



Quelle: Frontier Economics auf Basis von EWI (2021b), und SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021).

Hinweis: Wärmepumpen: 2030 (2040) untere Abschätzung 3,1 (8) Mio. zusätzl. WP, 3 kW Spitzenlast je Einheit und 80 % gleichzeitige Nutzung auf Basis von EWI (2021b). Obere Abschätzung 9 kW je Einheit (Inanspruchnahme Heizstab) und 90 % gleichzeitige Nutzung. E-Mobilität: 2030 untere Abschätzung 15 Mio. E-Autos gemäß Koalitionsvertrag bis 2030, 29 Millionen bis 2040 gemäß EWI (2021b), 11 kW Spitzenlast je Einheit und 3 % gleichzeitige Nutzung. Obere Abschätzung 7 % gleichzeitige Nutzung. Verschiedene Studien (vgl. Oliver Wyman (2018) oder McKinsey (2019) weisen zudem darauf hin, dass der Spitzenlast-Bedarf durch E-Mobilität bei stärkerer Lade-Gleichzeitigkeit höher liegen kann. Zusätzlich kann der Anstieg an Spitzenlast durch E-Mobilität lokal deutlich höher liegen (bspw. im sub-urbanen Raum mit hohem Anteil an E-Autos).

- **Sicherstellung flexibler und zuverlässiger Stromerzeugung, flexibler Nachfrage und Speicherung** – Die steigende Stromnachfrage und Spitzenlast müssen auch zukünftig jederzeit zuverlässig gedeckt werden – trotz Kohle- und Kernenergieausstieg und zunehmend vom Wind- und Sonnendargebot abhängiger Stromerzeugung. Hierzu bedarf es auch in einer klimaneutralen Stromversorgung zuverlässig verfügbaren und flexibel steuerbaren Stromerzeugungstechnologien und einer Flexibilisierung des Stromverbrauchs.

Zudem ergibt sich ein **erheblicher Bedarf, Strom zwischenspeichern**: Mit einer zunehmenden Elektrifizierung des Wärmesektors und dessen hoher Nachfrage in den Wintermonaten wird es zu einer sehr starken Zunahme der **Saisonalität der Stromnachfrage** kommen. Diese wird nicht durch das Profil der Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik abgebildet und ist im Fall von Photovoltaik sogar gegenläufig. Das heißt, während der Heizperiode im Winter ist die Einspeisung aus PV aufgrund geringerer Sonneneinstrahlung dargebotsbedingt deutlich geringer. Zudem sind bislang keine großvolumigen saisonalen Speichermöglichkeiten für elektrische Energie in Planung, da für derartige Lösungen erhebliche Investitionen getätigt werden müssen und zugleich derzeit noch keine wirtschaftlich tragfähigen Lösungen absehbar sind. Die Speicherung und spätere Bereitstellung der Energie wird voraussichtlich auch

zukünftig auf Basis gasförmiger Energieträger und dem (wasserstoffbasierten) Gassystem vorgenommen werden.

- **Netzausbaubedarf** – Die sich im Zuge des Ausbaus der Stromerzeugung aus fluktuierenden Erneuerbaren Energien verändernde Stromerzeugungstopologie wird zukünftig weiteren Netzentwicklungsbedarf in den Stromnetzen bedingen. Durch die zunehmende Elektrifizierung von Verbrauchsanwendungen wie Heizungen und Fahrzeugen verändert sich die Energieverbrauchsstruktur und erhöht sich der Stromverbrauch insbesondere in den Stromverteilnetzen. Entsprechend ist ein massiver Ausbau der Stromnetzinfrastruktur in Deutschland und Europa erforderlich. Die geschätzten Investitionskosten für das Übertragungsnetz betragen zwischen 75 Mrd. € und 79 Mrd. € bis 2035.⁵⁶ Darüber hinaus steigt der Netzausbaubedarf der Verteilernetze. So schätzt eine Gruppe von 60 Verteilnetzbetreibern den Ausbaubedarf für ihre Netze auf 16 Mrd. € bis 2030.⁵⁷

Bereits heute kommt es bei dem Ausbau der großen Stromtrassen zu langen Verzögerungen und hohen Kostensteigerungen.

Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass die zur Erhaltung der Systemsicherheit des Stromnetzes erforderlichen Dienstleistungen wie Frequenzhaltung, Blindleistung oder Versorgungswiederaufbau trotz Kohle- und Kernenergieausstieg auch zukünftig erhalten bleiben bzw. durch die Übertragungsnetzbetreiber erbracht werden können.

- **Akzeptanz vor Ort** – Die Umstellung der Stromversorgung auf erneuerbare Energien droht an der Akzeptanz vor Ort zu scheitern. Die erforderliche und rechtzeitige Erweiterung der deutschen EE-Stromerzeugung und Stromnetzinfrastruktur stellt unter den aktuellen Rahmenbedingungen eine erhebliche Herausforderung dar, da vielerorts erhebliche Widerstände gegen Infrastrukturmaßnahmen bestehen, die die Umsetzung der erforderlichen Maßnahmen erschweren und zeitlich verzögern.

3.3 Wasserstofffähige Gaskraftwerke als Rückgrat des deutschen Stromsystems

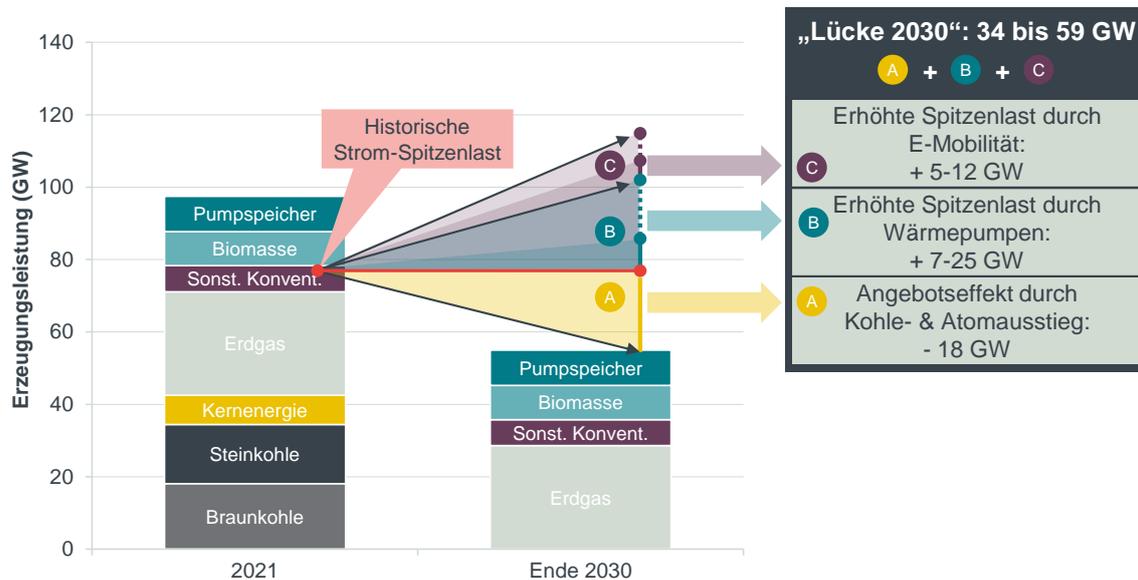
Bedarf für zusätzliche steuerbare Kapazitäten und Flexibilität

Die kombinierte Betrachtung der durch Kernkraft- und Kohleausstieg verringerten steuerbaren Leistung bei gleichzeitigem Wachstum der potenziellen zukünftigen Nachfragespitze in 2030 zeigt, dass **eine „Lücke“ zwischen steuerbarer Leistung und Nachfragespitze** entsteht. Je nach Entwicklung der zusätzlichen Nachfragespitze durch Wärmepumpen und E-Mobilität beträgt die Differenz zwischen steuerbaren Kapazitäten (aus heutiger Sicht, exkl. Zubau und unter der Annahme, dass heutige Gaskraftwerke erhalten bleiben) und Nachfragespitze **zwischen 34 GW und 59 GW**. Um zukünftig die Stromnachfrage bei Spitzenlast zu decken, müssen also steuerbare Kapazitäten zugebaut, bestehende Flexibilität erschlossen und zusätzliche Flexibilität geschaffen werden.

⁵⁶ Übertragungsnetzbetreiber (2021).

⁵⁷ Bundesnetzagentur (2021d).

Abbildung 21 Erwartete Entwicklung der steuerbaren Leistung (exkl. Zubauten) und der Nachfragespitze bis 2030



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Die „Lücke“ zwischen steuerbarer Erzeugung und Nachfragespitze entsteht durch zwei Effekte: Die Reduktion der steuerbaren Leistung (Angebotseffekt) und den Anstieg der Nachfrage (Nachfrageeffekt durch E-Mobilität und Wärmepumpen). Der Nachfrageeffekt entspricht den in Abbildung 20 dargestellten Parametern.

Der Reduktion der steuerbaren Leistung stehen allerdings derzeit nur wenige neu entstehende steuerbare Stromerzeugungskapazitäten gegenüber. Die Bundesnetzagentur führt Kapazitäten in Höhe von 3,6 GW auf, die entweder im Bau oder Probebetrieb sind.⁵⁸

Bedarf des Ausbaus von wasserstofffähigen Gas-Kraftwerken mittlerweile Konsens

Der Bedarf für zusätzliche gesicherte Leistung wird in Folge des Kohle- und Kernenergieausstiegs und begrenzter Alternativen⁵⁹ zukünftig vor allem durch wasserstofffähige Gas-Kraftwerke gedeckt werden müssen.

Zu diesem Ergebnis kommen zahlreiche Studien, welche mögliche Pfade zur Transformation des Stromsystems zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2045 aufzeigen. Beispielsweise...

- ...ermitteln die Gutachter des Energiewirtschaftlichen Instituts (EWI) an der Universität zu Köln im Rahmen der dena-Leitstudie 2 [dena (2021a)] einen Zubaubedarf von Gaskraftwerken (inkl. Wasserstoff) in Höhen von 15 GW bis 2030 bzw. 27 GW bis 2045. In einer Aktualisierung zur Berücksichtigung der Beschlüsse des Koalitionsvertrages passte das EWI den Zubaubedarf auf 23

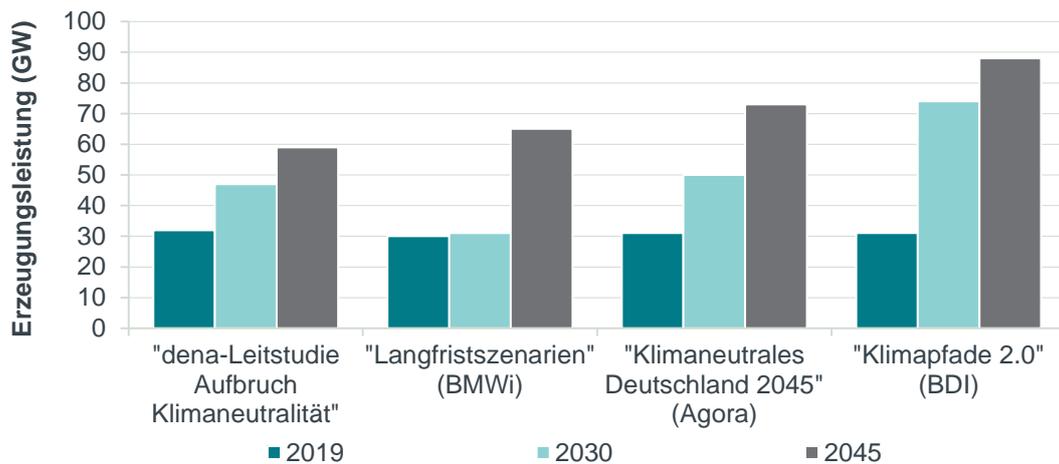
⁵⁸ Monitoringreferat der Bundesnetzagentur (2021).

⁵⁹ Theoretische Alternativen zu Gaskraftwerken bestehen vor allem in Flexibilität aus DSM, Pumpspeicherkraftwerken, Batterien oder Elektrolyseuren. Allerdings sind deren Ausbaupotenziale gering (insbesondere Pumpspeicherkraftwerke) bzw. sind diese vor allem dazu geeignet Stromnachfrage kurzfristig zu senken (z. B. Nachfrageflexibilität durch flexibles Laden von Elektromobilität) bzw. über kurze Zeiträume zwischenspeichern (z. B. Batterien).

GW bis 2030 an, eine Aktualisierung des Bedarfs für 2045 wurde nicht vorgenommen.⁶⁰

- ... kommen Prognos, Öko-Institut und Wuppertal-Institut in der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (2021) im Auftrag der Agora Energiewende zu einem Ausbaubedarf von Gaskraftwerken (inkl. Wasserstoff) von 19 GW bis 2030 bzw. 42 GW bis 2045.
- ... gehen BCG und Prognos in ihrer Studie „Klimapfade 2.0“ im Auftrag des BDI von einem Zubaubedarf Gaskraftwerke (inkl. Wasserstoff) von 43 GW bis 2030 bzw. 57 bis 2045 aus.
- ... schätzen die Fraunhofer et al (2021) in den vom Bundeswirtschaftsministerium beauftragten „Langfristszenarien“ einen Zubau von Gaskraftwerken (inkl. Wasserstoff) von 35 GW bis 2045 im zentralen Szenario „TN-Strom“. Diese Studie zeigt durch Sensitivitätsrechnungen zudem illustrativ, dass der Bedarf nach Gaskraftwerken (inkl. Wasserstoff) umso höher ist, je eher „optimale“ Bedingungen, wie zum Beispiel ein zügiger Stromnetzausbau, in der Praxis nicht umzusetzen sind (siehe Textbox unten).

Abbildung 22 Entwicklung der Erzeugungsleistung aus Gaskraftwerken (inkl. Wasserstoff)



Quelle: Frontier Economics auf Basis von EWI (2021b), Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021), BCG (2021), BMWi (2021b).

Hinweis: Es werden die Szenarien „Zielpfad“ aus BCG (2021) und „TN-Strom“ aus BMWi (2021b) dargestellt und „Bioenergie“ aus Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021) berücksichtigt.

Exkurs: Wasserstoff-Kraftwerke als Back-up gerade bei verzögertem Netzausbau relevant

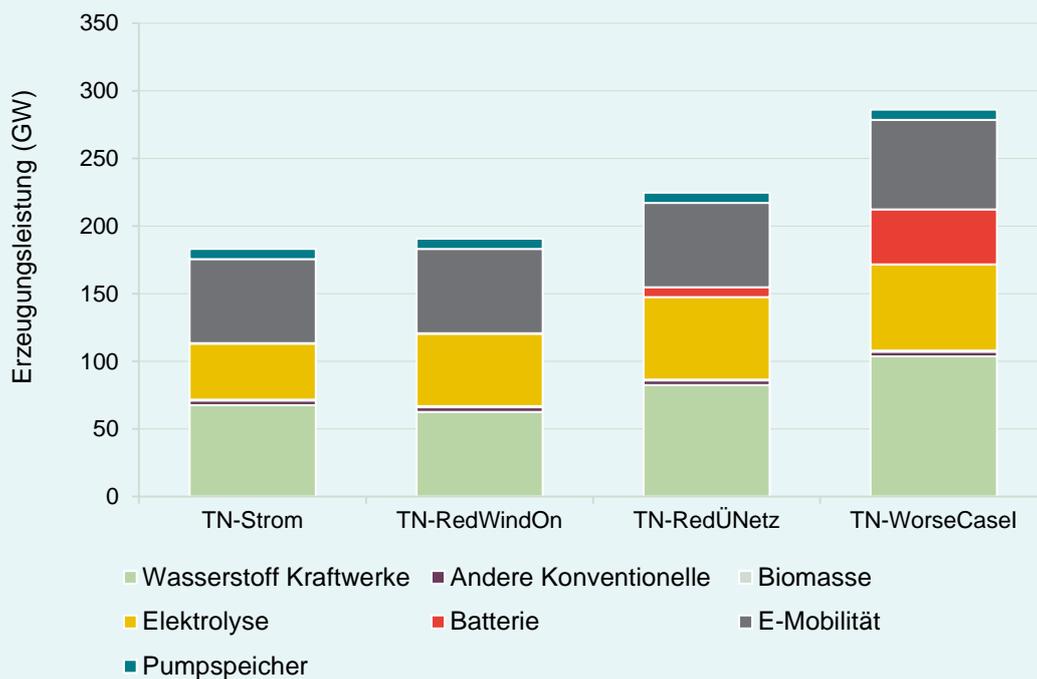
Die Studien zur Transformation des Stromsystems weisen unter Berücksichtigung der Annahmen und gewisser Spielräume für die Parameter häufig einen möglichen optimalen Pfad für die Transformation des Stromsystems aus. In den BMWi-Langfristszenarien werden dagegen auch Sensitivitäten betrachtet, welche die Implikationen von Abweichungen vom als „optimal“ angesehenen

⁶⁰ EWI (2021a).

Transformationspfaduntersuchen. Zum Beispiel wird in den Sensitivitäten ein geringerer Ausbau der Wind-Onshore-Kapazitäten („TN-RedWindOn“), verzögerter Übertragungsnetzausbau („TN-RedÜNetz“) und eine Kombination aus unter anderem geringeren erneuerbaren Erzeugungskapazitäten, einem verzögerten Übertragungsnetzausbau und geringerer Effizienz der Endanwendungen („TN-WorseCase“) unterstellt (Abbildung 23).⁶¹

Die Abweichungen vom „optimalen“ Szenario bedeuten in allen betrachteten Sensitivitäten eine gesteigerte Relevanz der Wasserstoff-Kraftwerke. Wasserstoff-betriebene Stromerzeugungs- und KWK-Anlagen werden zum Beispiel dann verstärkt eingesetzt, wenn der Ausbau der Übertragungsnetze geringer ausfällt: Ein geringerer oder verzögerter Netzausbau erhöht die Relevanz der dezentralen Strom-Versorgung bzw. -Einspeisung. Insbesondere eine Kombination aus Verzögerungen beim Ausbau der Erzeugungskapazitäten, Infrastruktur und geringerer Effizienz der Endanwendungen würde bedeuten, dass deutlich höhere Wasserstoff-betriebene Stromerzeugungs- und KWK-Kapazitäten notwendig sind, um den Strombedarf zuverlässig zu decken.

Abbildung 23 Steuerbare Kapazitäten in Deutschland in 2050 gemäß BMWi Langfristszenarien (verschiedene Sensitivitäten)



Quelle: Frontier Economics auf Basis von Fraunhofer ISI et al. (2021b)

Hinweis: Wasserstoff-Kraftwerke schließen KWK mit ein. Elektrolyse ist keine Erzeugungstechnologie, sondern eine verbraucherseitige Flexibilität.

⁶¹ Wir betrachten hier Sensitivitäten des Szenarios „TN-Strom“.

Die Bundesregierung erkennt Ausbaubedarf von Gaskraftwerken im Koalitionsvertrag an

Auch die Bundesregierung führt im Koalitionsvertrag aus, dass neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien auch die Errichtung moderner Gaskraftwerke – und zwar als am Strommarkt verfügbare Kapazitäten und nicht in der Netzreserve – notwendig sein wird, um den „steigenden Strom- und Energiebedarf zu wettbewerbsfähigen Preisen zu decken“.⁶²

3.4 Kopplung von wasserstofffähiger gasbasierter Stromerzeugung mit Wärmeerzeugung als KWK bringt zusätzliche Vorteile

Während die Notwendigkeit für den Erhalt und den Neubau von (wasserstofffähigen) Gaskraftwerken also in der Fachdebatte weitgehend unstrittig und von der Politik benannt ist, wird die zukünftige Rolle von KWK für die Stromversorgung weniger eindeutig beschrieben.

Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sind bereits heute steuerbar und zunehmend wasserstofffähig. Daher können KWK-Anlagen dem Stromsystem aus bestehenden und zukünftigen Kapazitäten steuerbare Leistung zur Verfügung stellen:

- Ein wesentlicher **Teil der bestehenden steuerbaren Stromerzeugungskapazitäten sind Kraftwerke mit (teilweiser) Wärmeauskopplung**. Etwa 15 GW von insgesamt 29 GW Kapazität aus Gaskraftwerken, 14 GW von 18 GW aus Braunkohle und 13 GW von 16 GW Steinkohle verfügen über eine (teilweise) Wärmeauskopplung.⁶³ Im Zuge der Beendigung der Kohleverstromung wird ein großer Teil dieser KWK-Kapazitäten den Strommarkt verlassen. Die **Wahrung der (KWK-)Kapazitäten aus Gaskraftwerken** sowie wo möglich ein „**Fuel Switch**“ von Kohle auf mittelfristig klimaneutrales Gas unter Weiterversorgung der Wärmesenken ist daher ein wichtiges Element, um in der Transformationsphase des Stromsystems die Versorgungssicherheit im Strom- und Wärmesektor zu erhalten. Dabei kann mit Hilfe von KWK-Anlagen eine hohe Effizienz der Brennstoffausnutzung, zum Beispiel von klimaneutralem Wasserstoff, erreicht werden (v. a. gegenüber der getrennten Erzeugung von Strom und Wärme aus Wasserstoff).
- In Deutschland wurden seit 2009 ca. **4.1 GW Kapazität aus etwa 63.000 kleinen KWK-Anlagen (mit weniger als 10 MW) gemäß KWKG zugelassen**.⁶⁴ Diese kleineren KWK-Anlagen sind zu einem Teil nicht im Stromgroßhandel aktiv, sondern werden gemäß den lokalen Strom- und Wärmebedarfen betrieben. Durch eine verstärkt systemdienliche Betriebsweise kann dem Stromsystem weitere wertvolle steuerbare (und gesicherte) Leistung zur Verfügung

⁶² SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021), Seite 58.

⁶³ Bundesnetzagentur (2021a).

⁶⁴ Die tatsächliche Anzahl der KWK-Anlagen in Deutschland dürfte weitaus höher liegen, da nicht alle Anlagen gemäß KWKG zugelassen sind. Kleine KWK-Anlagen sind definiert als Anlagen, die eine elektrische Leistung von weniger als 10 MW haben. Schätzungen zufolge gibt es in Deutschland KWK-Anlagen in Höhe von insgesamt (inkl. Anlagen außerhalb des KWKG) etwa 33,4 GW elektrischer Leistung (Öko-Institut, 2015). Stichtag 09.04.2020. Quelle: BAFA (2021).

gestellt werden. Darüber hinaus bieten diese Anlagen wertvolle Flexibilität für den sicheren Netzbetrieb und entlasten insbesondere die Stromverteilnetze.

- Mit dem **Neubau von großen (wasserstofffähigen) Gas-KWK-Anlagen** kann ein wesentlicher Teil des entstehenden Bedarfs für steuerbare Kapazitäten (vgl. Kapitel 3.3) gedeckt werden. Wie im Koalitionsvertrag der Bundesregierung ausgeführt, können dafür „hocheffiziente Gaskraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung“⁶⁵ genutzt werden. Der Koalitionsvertrag schlägt auch vor, dass damit (KWK-)Kohlekraftwerke ersetzt werden, die bis 2030 den Betrieb einstellen und zum Teil eine Wärmeauskopplung und Anbindung an ein Wärmenetz haben. Die vorhandene Infrastruktur an Kohlekraftwerksstandorten (Netzanbindung, ggfs. Anbindung an Fernwärmenetz) kann dabei weitergenutzt werden, um den zusätzlichen Aufwand für die Errichtung der Infrastruktur beim Bau neuer Gas-KWK-Anlagen zu reduzieren.
- In den Gebäude-, Gewerbe- und Industriesektoren können **neue, dezentrale (wasserstofffähige) KWK-Anlagen** genutzt werden, um eine effiziente Wärmeversorgung zu gewährleisten und dezentral Strom zu erzeugen. Dezentrale KWK-Anlagen könnten nicht nur eine Umstellung der Wärmeversorgung vieler Bestandsbauten (z. B. durch BHKW oder Wärmenetzen in Quartieren) ermöglichen, sondern auch die Stromnetze stützen und mit einer systemdienlichen Fahrweise zur Versorgungssicherheit beitragen.

3.5 KWK im Einsatz für systemdienliche Strom- und Wärmeerzeugung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden aus den besonderen Anforderungen der Transformation der Stromversorgung hin zur Klimaneutralität steuerbare (Gas-)Kraftwerke als entscheidender Baustein zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit identifiziert. Das Potential des KWK-Beitrags zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit wird jedoch in der Fachdebatte oft nicht vollständig berücksichtigt.

- So treten viele der Mangelsituationen, die eine Leistungsvorhaltung erfordern, in der kalten Jahreszeit auf;
- Gerade in solchen Situationen kann die KWK durch die gleichzeitige Bereitstellung von Wärme und Strom einen relevanten Beitrag zur gesicherten Leistung stellen;
- Zudem erlauben zusätzliche Wärmespeicher eine weitere Flexibilisierung des KWK-Betriebs und tragen zur Steigerung des KWK-Nutzungsgrads bei.

Stromversorgung in Perioden mit wenig Wind und Sonne

Die Auslastung der Erzeugungskapazitäten aus Wind und PV fluktuiert stark und schwankt in Summe in der Regel zwischen 5 % und 50 % der installierten Kapazität. Häufig ist die kumulierte Auslastung aller Wind- und PV-Anlagen in Deutschland regelmäßig über mehrere Tage deutlich unter 10 % der installierten Kapazität (siehe Abbildung 24 für das Beispiel des Dezembers 2020). Zum Beispiel lag die

⁶⁵ SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021).

Auslastung im Dezember 2020 in etwa 37 % der Viertelstunden bei weniger als 10 % der Kapazität. Zudem wird zukünftig der Strombedarf in der kalten Jahreszeit besonders stark ansteigen, da durch eine tendenziell zunehmende Elektrifizierung der Wärmeversorgung die Saisonalität des Wärmebedarfs zunehmend auf den Stromsektor wirkt, bei gleichzeitig wachsender Elektrifizierung des Verkehrs.

Abbildung 24 Auslastung von PV- und Windstromkapazitäten im Zeitraum 1. bis 31. Dezember 2020 (viertelstündlich)



Quelle: Frontier Economics auf Basis von Daten zur realisierten Stromerzeugung von smard.de und energy-charts.info.

Die installierte Leistung aus den erneuerbaren Energieträgern Wind und Sonne liefert daher, insbesondere in Phasen mit wenig Wind und Sonne, nur einen Bruchteil der benötigten Leistung zur Deckung der Nachfrage. Um in einem auf dargebotsabhängigen Energieträgern wie Wind und Sonne basierenden System den tatsächlichen Strombedarf zu jedem Zeitpunkt zu decken, muss also auf gespeicherte Energiemengen, verschiebbare Stromlasten und andere, steuerbare Erzeugungstechnologien zurückgegriffen werden.

Gleichzeitigkeit von Strom- und Wärmebedarf

KWK-Anlagen können dem Stromsystem steuerbare Erzeugungskapazitäten zur Deckung der Residuallast zur Verfügung stellen. Aufgrund der gleichzeitigen Erzeugung von Wärme und Strom gilt dies insbesondere in Situationen, in denen auch ein entsprechender Wärmebedarf besteht. Eine Wärmesenke kann der direkte Verbrauch der Wärme durch einen Abnehmer sein (z. B. zum Heizen von Gebäuden oder Prozesswärme für Industrieanwendungen) oder die Speicherung der Wärme für die spätere Nutzung.

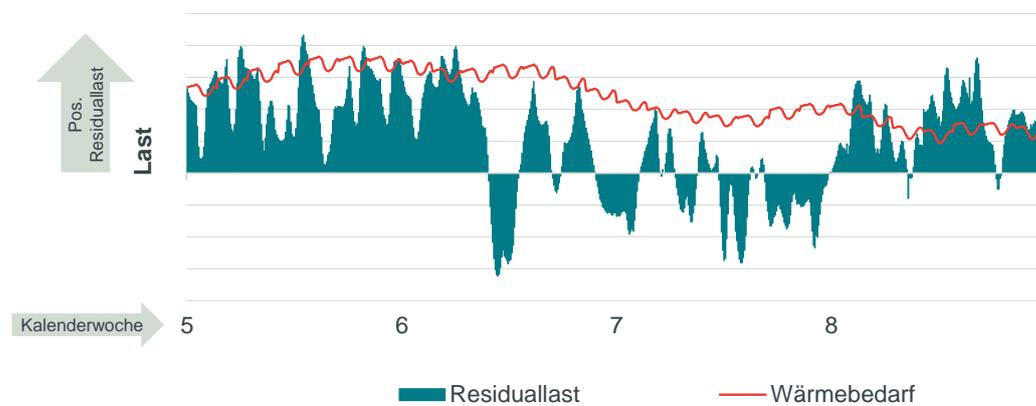
Während das Bedarfsprofil für Prozesswärme kaum von der Außentemperatur abhängig ist, ist das Bedarfsprofil für Raumwärme durch eine starke Saisonalität geprägt. Im Sommer gibt es über mehrere Monate hinweg nur einen vergleichsweise geringen Wärmebedarf, insbesondere zur Trinkwarmwasserbereitung. In den Wintermonaten gibt es dagegen einen stetigen Wärmebedarf auf hohem Niveau.

Wärmespeicher ermöglichen Entkopplung von Wärmebedarf und „zeitliche Verschiebung“ der thermischen Energie

Durch Wärmespeicher kann das Zusammenspiel von zunehmender fluktuierender Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien und KWK-Stromerzeugung optimiert

werden. Selbst wenn in den Wintermonaten ein durchgehend hoher Wärmebedarf vorliegt, besteht die Gleichzeitigkeit des Wärmebedarfs und der Residuallast nicht durchgängig, wie die Betrachtung eines exemplarischen Wintermonats zeigt (Abbildung 25). Vielmehr kommen regelmäßig Perioden mit negativer Residuallast vor. Bei einer reinen systemdienlichen Fahrweise von KWK-Anlagen würde dies bedeuten, dass in solchen Perioden die KWK-Anlage nicht betrieben wird. Die Wärmenachfrage müsste aus alternativen Quellen bzw. mit Hilfe von Wärmespeichern bedient werden. Die Wärmespeicher können dann gefüllt werden, wenn Strombedarf besteht, jedoch nicht ausreichend gleichzeitige Wärmenachfrage vorhanden ist.

Abbildung 25 Profil von Strom- und Wärmebedarf (Residuallast), approximiert für 2030 (Kalenderwochen 5-8)



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Das Residuallastprofil basiert auf dem Jahr 2012 und wurde für die EE-Leistung in 2030 hochskaliert. Es ist ein typisches Wärmebedarfsprofil für strombasierte Wärmeerzeugung (Wärmepumpe) dargestellt.

Mit einer systemdienlichen Einsatzlogik leistet die KWK einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit. Dies bedeutet, dass die KWK-Anlagen im Rahmen einer flexiblen Fahrweise als Ergänzung zu den dargebotsabhängigen erneuerbaren Erzeugungskapazitäten an den Strommärkten aktiv ist. Darüber hinaus kann die KWK Systemdienstleistungsprodukte zur Verfügung stellen (kleine KWK zum Beispiel durch Integration in „virtuelle Kraftwerke“) und von den Netzbetreibern netzdienlich eingesetzt werden. In vielen Fällen werden vor allem große KWK-Anlagen heute schon derartig betrieben. Um diese Betriebslogik, auch bei kleinen KWK-Anlagen, stärker zu unterstützen, müssen die Rahmenbedingungen entsprechend ausgestaltet sein (siehe Kapitel 5). Dies würde auch eine Anlagenkonzeption zur systemdienlichen Fahrweise mit angepasster Dimensionierung und Kombination mit größer dimensionierten Wärmepuffern bzw. Wärmespeichern unterstützen (s. Kapitel 2.4).

Die KWK ist zu einer flexiblen Fahrweise fähig, aber wird nicht entsprechend betrachtet

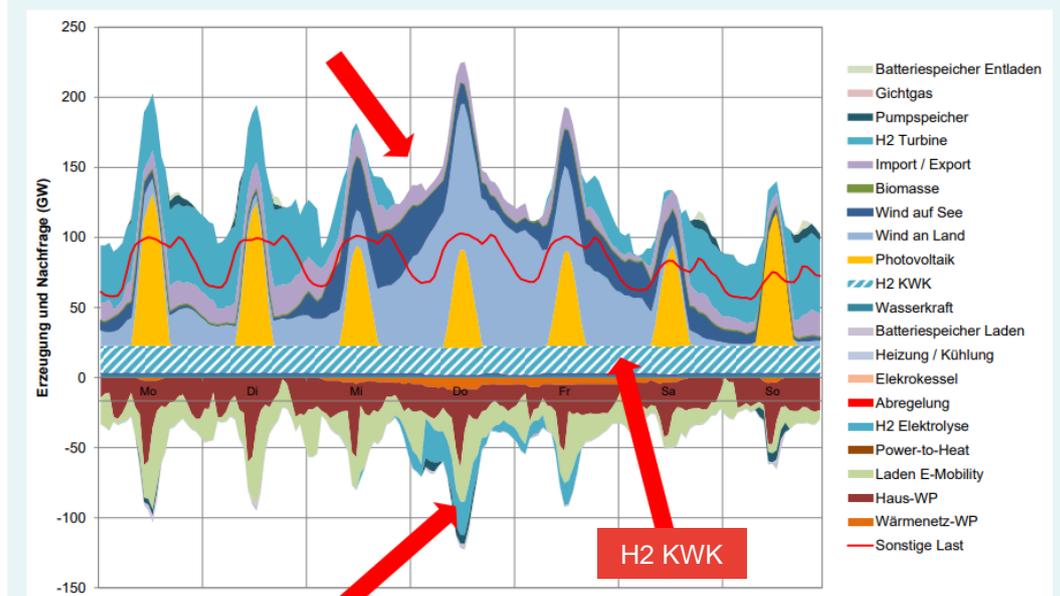


Die oben beschriebene Möglichkeit einer stärker flexibilisierten und systemdienlichen Fahrweise der KWK hat das Potenzial, eine sichere Energieversorgung mit gleichzeitigem Ausbau erneuerbarer Energien langfristig zu unterstützen.

In der Vergangenheit wurden KWK-Anlagen in der Regel wärmegeführt eingesetzt (s. Kapitel 2.4). Zukünftig werden voraussichtlich nahezu alle Anlagen systemdienlich in der Form eingesetzt werden, sodass sie die Integration der Erneuerbaren Energien unterstützen, insofern die Rahmenbedingungen dafür angepasst werden (siehe hierzu Kapitel 5).

Strommarktmodelle spielen für die Planung und Ausgestaltung der kurz- bis langfristigen Versorgung eine große Rolle und prägen somit maßgeblich den energiewirtschaftlichen Diskurs. Jedoch wird die KWK in vielen Strommarktmodellen sowohl bisher als auch in Zukunftsszenarien, nicht hinreichend als stromseitig flexible Technologie modelliert. Als Beispiel können die vom BMWi in Auftrag gegebenen Langfristszenarien für 2050 dienen.⁶⁶ Abbildung 26 zeigt die Stromerzeugung (positiver Bereich der y-Achse) und -nachfrage (negativer Bereich der y-Achse) für Kalenderwoche 5 in 2050 in Deutschland. Es sind die Ergebnisse für das Szenario „TN-RedÜNetz“, ein Szenario mit reduziertem Übertragungsnetzausbau, dargestellt.

Abbildung 26 Strombereitstellung und -nachfrage in Deutschland 2050, Kalenderwoche 5 auf Basis von BMWi-Langfristszenarien, „TN-RedÜNetz“ (Szenario mit verzögertem Übertragungsnetzausbau)



⁶⁶ BMWi 2021b.

Quelle: BMWi (2021b) - Langfristszenarien – Webinar Szenariovarianten TN-Strom 02.12.2021.

Während die mit Wasserstoff betriebene KWK in einem Langfristszenario mit verzögertem Übertragungsnetzausbau („TN-RedÜNetz“) zwar erheblich zur Strombereitstellung im Winter beiträgt, agiert die KWK dennoch als durchgehend aktive Grundlastzeugung (Abbildung 26). Die Flexibilität wird stattdessen angebotsseitig vornehmlich durch Wasserstoff-Turbinen und Pumpspeicher gewährleistet. Steuerbare KWK-Anlagen können und sollten auch zu dieser Flexibilität beitragen. Während dies für einen Teil der KWK-Anlagen bereits heute zutrifft, kann das technisch vorhandene Flexibilitätspotenzial mit der entsprechenden Anpassung der Rahmenbedingungen und dem Ausbau von Wärmespeicherkapazitäten weiter erschlossen werden.

4 TRANSFORMATIONSPFADE FÜR EINE KLIMANEUTRALE KWK

Erzeugungskapazitäten aus KWK-Anlagen bedienen heute einen wesentlichen Teil der Strom- und Wärmebedarfe in Deutschland. Darüber hinaus hat die Betrachtung der Potenziale in der Strom- und Wärmeversorgung in den Kapiteln 2 und 3 gezeigt, dass KWK-Erzeugungskapazitäten sowohl im Prozess der Umstellung auf klimaneutrale Energieträger (von heute bis etwa 2045) als auch im „klimaneutralen Zielsystem“ (ab etwa 2045) eine wichtige Rolle beizumessen ist.

Auf dem Weg zum klimaneutralen Energiesystem wird sich dabei auch die Rolle der KWK weiterentwickeln. In diesem Kapitel stellen wir einen zeitlich strukturierten Entwicklungspfad für den Transformationsprozess der KWK dar.

4.1 Zusammenfassung

In diesem Kapitel leiten wir folgende Schlussfolgerungen zur Transformation der KWK ab:

- **KWK-Kapazitäten als Säule der Strom- und Wärmeversorgung in Deutschland erhalten** (Kapitel 4.2) – Die bestehenden KWK-Anlagen in Deutschland haben eine große Bedeutung für die heutige Strom- und Wärmeversorgung durch die Bereitstellung gesicherter und steuerbarer Leistung und die Darbietung von Systemdienstleistungsprodukten. Während bereits heute KWK-Anlagen für vielfältige Anwendungen über verschiedene Sektoren hinweg zahlreich eingesetzt werden, steigt zukünftig der Bedarf für steuerbare Strom- und Wärmeerzeugungskapazitäten weiter. Der Erhalt der heutigen (nicht kohlebasierten) Erzeugung aus KWK-Anlagen kann einen Beitrag leisten, diesen Bedarf zu decken. Langfristig kann die Erzeugung aus KWK-Anlagen auf Basis von zunehmend erneuerbaren und emissionsarmen Gasen im Einklang mit den Klimaschutzzielen auch weiter ausgebaut werden.
- **Bestehende und neue KWK-Anlagen können den Strom- und Wärmesystemen zunehmend Flexibilität zur Verfügung stellen** (Kapitel 4.3) – KWK-Systeme sind bereits heute eine in weiten Grenzen steuerbare Erzeugungstechnologie. Die Steuerbarkeit der KWK-Anlagen muss jedoch zum Teil noch für die Strom- und Wärmesysteme erschlossen werden. Dafür werden z. B. **angepasste Wärmeversorgungs-Konzepte** (inkl. Wärmespeicher), eine angepasste **Dimensionierung** (höhere Spitzenleistung) und eine angepasste **Fahrweise** der KWK-Anlagen benötigt. Um die Steuerbarkeit für die Strom- und Wärmesysteme zu erschließen, können bestehende KWK-Anlagen umgerüstet und in ihrer Betriebslogik angepasst werden. Neue KWK-Systeme sollen für einen Betrieb konzeptioniert sein, der den Strom- und Wärmesystemen einen hohen Grad an Steuerbarkeit und damit Versorgungssicherheit zur Verfügung stellt. Die KWK-Anlagen agieren somit im Zeitverlauf zunehmend als „Back-up“ für die fluktuierende erneuerbare Strom- und Wärmeerzeugung. Hierfür müssen die entsprechenden Rahmenbedingungen geschaffen werden (siehe Kapitel 5).

- **Die KWK kann mit schrittweiser Energieträger-Umstellung effektiv THG-Emissionen reduzieren (Kapitel 4.4)** – Durch einen stärkeren Einsatz von Biomasse (bzw. Biomethan) in der kurzen Frist (bis 2030) und anschließend einen zunehmenden Einsatz von Wasserstoff können die Emissionen aus der KWK-Erzeugung im Einklang mit dem eingeleiteten Klimaneutralitätspfad effektiv reduziert werden. Während zunächst Kohle und Öl aus dem Brennstoffmix verdrängt wird, kann ab spätestens 2030 auch Erdgas durch klimaneutrale Energieträger ersetzt werden. Entscheidend für die Entwicklung des Brennstoff-Mix sind die energiepolitischen Rahmenbedingungen und wirtschaftlichen Anreize, sowohl für den Wasserstoff-Hochlauf und die Erschließung der Biomassepotenziale, als auch für den Einsatz der emissionsarmen und klimaneutralen Brennstoffe in Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen. **Durch die Möglichkeit des Brennstoffwechsels bei KWK-Anlagen (z. B. von fossilem Methan auf Biomethan und auf Wasserstoff) besteht bei Gas-KWK-Anlagen kein Risiko eines Lock-ins in eine emissionsintensive Technologie.**

4.2 KWK-Kapazitäten als wichtige Säule der Strom- und Wärmeversorgung in Deutschland weiter ausbauen

In Kapitel 1 haben wir gezeigt, dass die Umstellung auf eine klimaneutrale Energieversorgung zahlreiche Herausforderungen mit sich bringt. In Deutschland wird neben dem Ausstieg aus der Atomenergie auch der Ausstieg aus der Stein- und Braunkohle realisiert, während gleichzeitig der Ausbau erneuerbarer und emissionsarmer Kapazitäten zur Strom- und Wärmeerzeugung beschleunigt werden muss.

Hoher Anteil der KWK an Strom- und Wärmebereitstellung

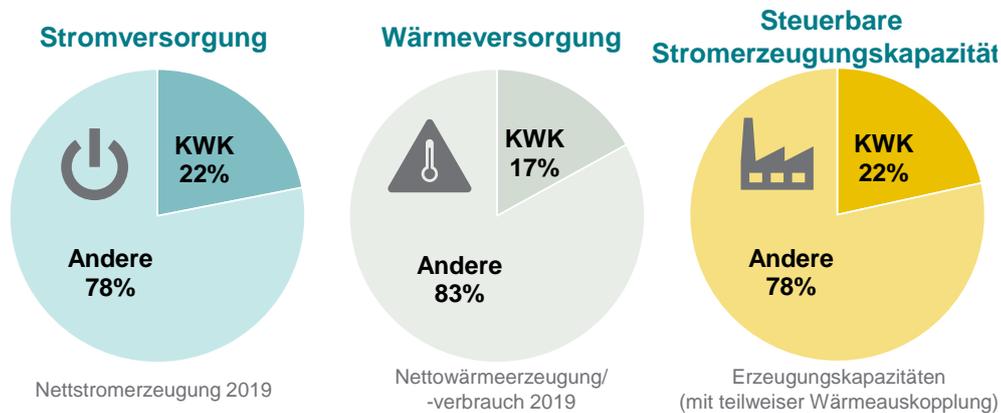
Die bestehenden KWK-Anlagen haben eine große **Bedeutung für die heutige Strom- und Wärmeversorgung** in Deutschland (Abbildung 27):

- Die Stromerzeugung aus KWK-Anlagen beträgt etwa 113 TWh pro Jahr (2019). Dies entspricht etwa **22 % der gesamten Nettostromerzeugung** in Deutschland. Fast 80 % davon wird bereits heute mit Erdgas und Biomasse betrieben, Kohle macht nur einen vergleichsweise geringen Anteil (etwa 13 % in 2019) der KWK-Stromerzeugung aus (siehe Kapitel 4.4 für Details).
- In Deutschland gibt es etwa 23 GW elektrische Erzeugungskapazität aus KWK-Anlagen.⁶⁷ Damit werden etwa **22 % der gesamten steuerbaren Erzeugungskapazität für Strom in Deutschland (etwa 105 GW in 2019) von KWK-Anlagen** zur Verfügung gestellt.

⁶⁷ Unseres Wissens liegen keine Informationen über die elektrische KWK-Erzeugungsleistung in Deutschland vor. In der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur ist zwar angegeben, welche Kraftwerke über eine Wärmeauskopplung verfügen. Es werden jedoch keine Angaben zur Dimension der Wärmeauskopplung gemacht, wobei davon auszugehen ist, dass viele Kraftwerke nur über eine teilweise Wärmeauskopplung verfügen. Daher wurde die Erzeugungsleistung aus KWK-Anlagen hier auf Basis der bekannten historischen Stromerzeugung (2019) und einer Auslastung der KWK-Anlagen von 5.000 Vollbenutzungsstunden (Input der Projekt-Partner) abgeschätzt.

- KWK-Anlagen haben eine Nettowärmeerzeugung von etwa 225 TWh pro Jahr (2019). Damit **stellen KWK-Anlagen etwa 17 % der benötigten Wärme** in Deutschland zur Verfügung.

Abbildung 27 Beitrag der KWK zur Strom- und Wärmeversorgung in Deutschland und Anteil der KWK an der steuerbaren Stromerzeugungskapazität (2019)



Quelle: Frontier Economics basierend auf UBA (2021c), Fraunhofer ISE (2020b), BMWI (2021a), Bundesnetzagentur (2021a), Bundesnetzagentur (2021b).

Hinweis: Die Erzeugungsdaten beziehen sich auf 2019, um Einflüsse der Corona-Pandemie (in Daten für 2020 und 2021) nicht abzubilden. Die steuerbare Erzeugungskapazität wurde geschätzt auf Basis der historischen Stromerzeugung (2019) und einer Auslastung der KWK-Anlagen von 5.000 Vollbenutzungsstunden (Input der Projekt-Partner).

Weitere Leistungen der KWK: Frequenz-, Spannungshaltung und Schwarzstartfähigkeit

KWK-Anlagen erbringen über die Erzeugung von Wärme und Strom und die Bereitstellung von steuerbaren Erzeugungskapazitäten (Leistung zur Residuallastdeckung) hinaus weitere systemstützende Leistungen. Zum Beispiel werden KWK-Anlagen auch zur **Frequenz- und Spannungshaltung** im Stromnetz eingesetzt.⁶⁸ Die rotierenden Massen der KWK-Anlagen tragen zur Momentanreserve, die wesentliche Beiträge für die Frequenzhaltung im Stromnetz liefert, bei und bieten aktiv Regelenergieprodukte im Markt an. Bei Netzausfall können notstromfähige KWK-Anlagen einen wichtigen Beitrag leisten, die Stromspannung für einen **Schwarzstart** der Netze zu erzeugen.

Durch den Ausstieg aus der Kernenergie und der Verstromung von Braun- und Steinkohle gehen Erzeugungstechnologien vom Netz, die ebenfalls Leistungen zur Frequenz- und Spannungshaltung zur Verfügung gestellt haben. Dementsprechend gewinnen die verbleibenden Anlagen, die in der Lage sind, Frequenz- und Spannungshaltung zu liefern, deutlich an Bedeutung für die **Wahrung der Stromsystemsicherheit** in Deutschland und im europäischen Verbundnetz.

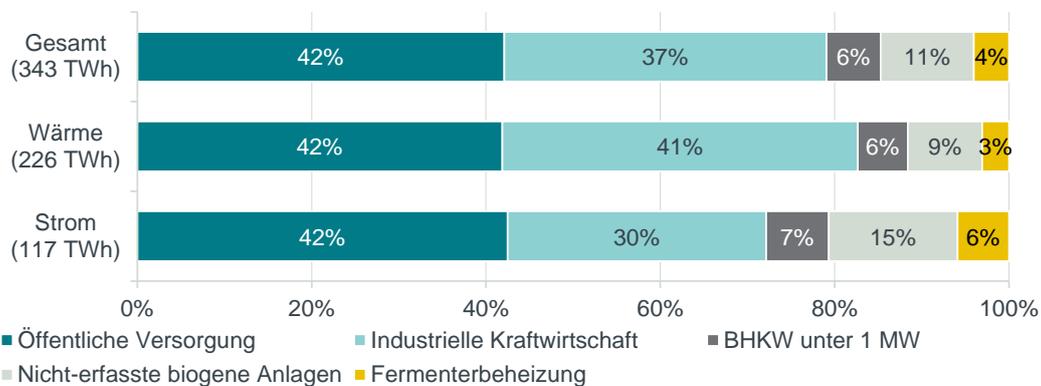
⁶⁸ 50Hertz (2018).

KWK-Anlagen im Einsatz für viele Anwendungen: in der öffentlichen Versorgung, in der Industrie sowie in der Objekt- und Quartiersversorgung

KWK-Anlagen sind ein wichtiger Baustein zur **Strom- und Wärmeversorgung unterschiedlicher Sektoren und Anwendungen**. Strom und Wärme aus KWK-Anlagen werden zu vergleichbaren Anteilen für die öffentliche Versorgung (etwa 42 % der Gesamtenergie in 2017) und für die industrielle Kraftwirtschaft (37 %) erzeugt (Abbildung 28). Der Erzeugungsanteil für lokale Bedarfe aus BHKW (unter 1 MW) beträgt etwa 6 %.⁶⁹ Damit wird die KWK vielseitig für unterschiedliche Sektoren, Branchen und Bedarfe eingesetzt.

Neben einem vielfältigen Anwendungsfeld werden KWK-Anlagen auch **in großer Anzahl und in vielfältigen dezentralen Versorgungslösungen eingesetzt**. Neben den „großen“ bzw. zentralen Gas- und Kohle-KWK-Anlagen in der öffentlichen Versorgung, besteht eine große Anzahl an KWK-Anlagen zur Energieversorgung in der Industrie und Quartieren bzw. Gebäuden. Allein seit 2009 wurden in Deutschland mehr als 66.000 KWK-Anlagen installiert. Während die anteilige Erzeugung kleiner KWK-Anlagen vergleichsweise gering ist, machen sie jedoch einen Großteil der Anzahl der installierten Anlagen aus. Etwa 99 % der seit 2009 installierten KWK-Anlagen haben eine Leistung von weniger als 1 MW.⁷⁰ Somit wird die KWK-Technologie nicht nur in einigen Großkraftwerken eingesetzt, sondern auch in großer Anzahl für weitere dezentrale Anwendungen in der Industrie und in Gebäuden (Objekt- und Quartiersversorgung).

Abbildung 28 Anteilige KWK-Erzeugung nach Anwendung bzw. Anlagen-Typ (2017)



Quelle: Frontier Economics basierend auf BMWi (2019).

Steigender Bedarf für steuerbare Strom- und Wärmeerzeugung bietet zukünftig zunehmende Einsatzmöglichkeiten für KWK

Im Zuge der Transformation zu einem erneuerbaren Energiesystem entstehen mittelfristig (bis 2030) und langfristig (bis 2045) zusätzliche Bedarfe für (steuerbare) Erzeugungsleistung für Strom und Wärme. So zeichnen sich in der Wärmeversorgung wachsende Einsatzmöglichkeiten für KWK ab, wie in Kapitel 2 dargelegt:

⁶⁹ Zusätzlich stammen etwa 4 % der KWK-Erzeugung aus der Fermenterbeheizung und etwa 11 % aus nicht-erfassten biogenen Anlagen. Quelle: BMWi (2019).

⁷⁰ Quelle: BAFA (2021b).

- Eine klimaneutrale Wärmeversorgung erfordert eine Vielfalt an Technologien, die auch **zentrale KWK-Anlagen** (vornehmlich zur Fernwärme-Versorgung) und **dezentrale KWK-Anlagen** (z. B. Industrie- oder Objektversorgung) umfassen;
- Eine kurzfristig erdgasbasierte und mittelfristig defossilisierte **KWK kann maßgeblich zur Wärmewende beitragen**, u. a. aufgrund der gleichzeitigen (z. T. dezentralen) Strom- und Wärmebereitstellung; und
- **Wärmenetze werden absehbar auch mittel- und langfristig für einen Teil der Wärmeversorgung genutzt** und zur Defossilisierung der Wärmeversorgung weiter zu- bzw. ausgebaut. Neben dargebotsabhängigen erneuerbaren Wärmeversorgungstechnologien werden hier auch ergänzende, steuerbare Wärmeversorgungstechnologien wie die KWK benötigt.

Auch **in der Stromversorgung besteht und steigt zukünftig das Potential für einen systemdienlichen Einsatz von KWK-Anlagen**, wie in Kapitel 3 dargelegt:

- Der Strombedarf wird trotz Effizienzsteigerungen deutlich steigen und es entsteht **Bedarf für zusätzliche gesicherte und steuerbare Stromerzeugungskapazitäten**, wie sie KWK bereitstellen kann;
- Zukünftig werden **effiziente wasserstofffähige Gas-Kraftwerke das Rückgrat des deutschen Stromsystems** bilden, deren Bedarf und energiewirtschaftliche Bedeutung vor allem bei einem verzögerten Stromnetzausbau noch ansteigt; und
- durch den **Zubau von zentralen und dezentralen KWK-Anlagen** kann zusätzliche steuerbare Stromerzeugungsleistung geschaffen werden und die Strom-Versorgungssicherheit sowohl auf Systemebene als auch lokal in den Verteilnetzen unterstützt werden.

Die Analysen zur Transformation hin zu einer klimaneutralen Strom- und Wärmeversorgung verdeutlichen, dass sowohl in der Übergangsphase (heute bis etwa 2045) als auch im „Zielsystem“ Bedarf für den Einsatz von KWK-Anlagen besteht. Dieser Bedarf umfasst den **Erhalt der heutigen KWK-Erzeugung** (unter Berücksichtigung des Ausstiegs aus der Kohleverstromung) und den bedarfsgerechten **Zubau von neuen KWK-Kapazitäten**, zur kombinierten Wärmebedarfsdeckung und Strom-Residuallastdeckung. Davon ausgehend zeichnen wir nun mögliche Pfade für die Entwicklung und Transformation der KWK-Erzeugungskapazitäten hin zu einem klimaneutralen Energiesystem.

Treiber für die zukünftige Strom- und Wärmeerzeugungskapazitäten aus KWK-Anlagen

Die zukünftige Entwicklung der Strom- und Wärmeerzeugungskapazitäten aus KWK-Anlagen ist mit großer Unsicherheit behaftet, nicht zuletzt durch den erheblichen Einfluss der energiepolitischen Rahmenbedingungen und Vorgaben. Es können jedoch wesentliche Eckpunkte und Treiber für die zukünftige Entwicklung der KWK-Erzeugung identifiziert werden:

- Der **Klimaschutz** ist wesentlicher Treiber beim Umbau des Energiesystems. KWK-Anlagen können in den Strom- und Wärmesektoren unter anderem mit einer effizienten Energieumwandlung, der Fähigkeit zur Umstellung auf

emissionsarmen Wasserstoff und unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten (z. B. öffentliche Versorgung, Industrie, Objekt- und Quartiersversorgung) zum Klimaschutz beitragen.

- Ein Großteil der Stromerzeugungskapazitäten wird bis 2045 mittels dargebotsabhängiger erneuerbarer Erzeugungstechnologien zur Verfügung gestellt. KWK-Anlagen können als steuerbare Ergänzung zu dargebotsabhängiger Erneuerbaren-Einspeisung dienen, die Stromerzeugung an die Residuallast anpassen und wesentlichen Beitrag zur Bereitstellung von gesicherten Stromerzeugungsleistung liefern.
- KWK-Anlagen können die Stromnetze bei einer dezentralen Einspeisung entlasten, insbesondere wenn die Stromnetze durch eine zunehmende dezentrale Last, zum Beispiel durch E-Mobilität, geprägt werden. Darüber hinaus erlaubt die Steuerbarkeit der KWK-Anlagen auch deren Einsatz für Engpassmanagement der Netzbetreiber.
- Die Transformation hin zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung umfasst den Zubau von Wärmenetzen.⁷¹ In Kombination mit zum Teil dargebotsabhängigen Wärmeerzeugungstechnologien stellt die KWK für die Wärmenetze benötigte steuerbare Leistung zur Verfügung. Zum Beispiel geht die dena-Leitstudie 2 [dena (2021a)] von einem Anstieg der Anschlüsse von Wohngebäuden an Wärmenetze von 1,3 Mio. Anschlüssen in 2020 auf 1,8 Mio. Anschlüssen in 2040 aus.
- Die Transformation der Energieversorgung zur Klimaneutralität erfolgt unter Berücksichtigung der **Versorgungssicherheit** für Strom und Wärme in Deutschland. Moderne (wasserstofffähige) Gaskraftwerke leisten einen „wesentlichen Beitrag zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit“⁷². KWK-Anlagen sind in der Lage, die Sicherheit der Strom- und Wärmeversorgung zu wahren:
 - Die Herausforderungen in der Transformation der Strom- und Wärmeerzeugung sind bereits durch die laufenden energiepolitischen Maßnahmen derart groß, dass kurzfristig ein Erhalt der **bestehenden KWK-Erzeugung** (mit Ausnahme der kohlebefeuelten Anlagen) einen Beitrag leisten kann.
 - Der **Ausstieg aus der Kohleverstromung muss teilweise durch neue Erzeugungskapazitäten kompensiert werden**. U. a. müssen zumindest in Teilen die kohlebefeuelten KWK-Kapazitäten – zusätzlich zur Nutzung von Abwärme und erneuerbaren Energien – durch H₂-ready konfigurierte, gasbefeuelte KWK-Anlagen ersetzt werden, damit die Wärmebereitstellung der Wärmenetze weiterhin gewährleistet ist.
 - Darüber hinaus ist der **Zubau steuerbarer Erzeugungskapazitäten** notwendig, um die Stabilität der Stromversorgung zu gewährleisten. Die Ausstiege aus der Kernenergie und Kohleverstromung bedeuten die Abschaltung von etwa 43 GW bestehender Erzeugungskapazität bis voraussichtlich 2030.⁷³ Die benötigte steuerbare Leistung zum Ausgleich dieser Reduktion

⁷¹ SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021), BMWK (2022A), EWI (2021b), Agora Energiewende (2021).

⁷² BMWK (2022A), S.17.

⁷³ EWI (2021a) SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021) EWI (2021b).

der Erzeugungskapazitäten kann unter anderem von zentralen wie auch dezentralen KWK-Anlagen geliefert werden.

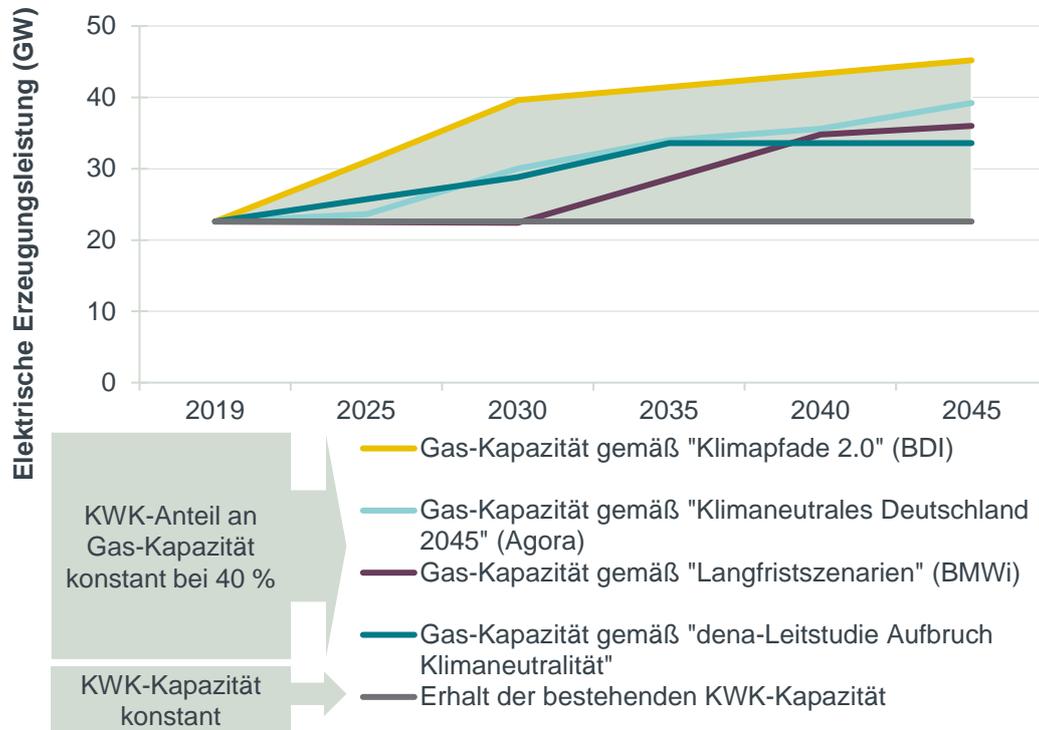
- Der Umbau der Strom- und Wärmeversorgung zur Klimaneutralität verursacht, gegenüber dem Beibehalt des bestehenden Systems, erhebliche Kosten und Investitionsbedarfe. Aus diesem Grund muss die **Wirtschaftlichkeit** möglicher Transformationspfade und die **Akzeptanz der Gesellschaft** berücksichtigt werden.
 - Für die Wirtschaftlichkeit der Energiebereitstellung steigt die Relevanz der Umwandlungseffizienz mit höheren Brennstoffkosten. Bei zunehmenden Brennstoffkosten, zum Beispiel durch den Einsatz von Wasserstoff an Stelle von fossilem Methan, erlaubt die KWK eine effiziente Umwandlung der Energie in Strom und Wärme.
 - Je nach Anwendungsfall in der Wärmeversorgung haben KWK-Anlagen wirtschaftliche Vorteile gegenüber alternativen Wärmeversorgungslösungen (s. Kapitel 2.3).
 - Die Partizipation unterschiedlicher Akteure der Energiewende (z. B. Unternehmen, Haushalte) umfasst die Realisierung lokaler Strom- und Wärmeversorgungslösungen. In diesem Zusammenhang kann die KWK-Technologie eine zentrale Rolle spielen, da sie die Energieversorgung vor Ort für Industrieanwendungen, Gebäude oder Quartiere ermöglicht.

Pfade für Strom- und Wärmeerzeugungskapazitäten aus KWK-Anlagen

Auf Basis der bestehenden KWK-Erzeugungsleistung (etwa 23 GW bzw. etwa 40 % der bestehenden Gas-Kapazitäten in 2019) und Studien zur Umstellung der Energieversorgung in Deutschland bis 2045 kann ein möglicher Entwicklungsraum der zukünftigen KWK-Erzeugungsleistung abgeleitet werden (Abbildung 29):

- Das untere Ende der sinnvollen KWK-Entwicklung entspricht einer konstanten KWK-Kapazität bis 2045 (etwa 23 GW): Dies bedeutet, dass Stein-/Braunkohle- und Öl-KWK mit neuen KWK-Kapazitäten (z. B. Gas/Wasserstoff) ersetzt wird und die Kapazität damit erhalten bleibt.
- Weitere mögliche Pfade werden auf Basis des Gaskraftwerks-Zubaubedarfs verschiedener Energiesystem- bzw. Strommarktmodellierungen ermittelt. Es wird zugrunde gelegt, dass der KWK-Anteil an den Erzeugungskapazitäten aus Gas- und Wasserstoffkraftwerken konstant bleibt (40 %). Bei einem steigenden Bedarf für Gas- bzw. Wasserstoffkraftwerke steigt somit auch das Potenzial für KWK-Kapazitäten.

Abbildung 29 Mögliche Entwicklungen der zukünftigen Erzeugungskapazitäten aus KWK-Anlagen



Quelle: Frontier Economics auf Basis von UBA (2021c), EWI (2021b), Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021), BCG (2021), BMWi (2021b).

Hinweis: Die KWK-Erzeugungskapazität in 2019 wurde geschätzt auf Basis der historischen Stromerzeugung (2019) und einer Auslastung der KWK-Anlagen von 5.000 Vollbenutzungsstunden. Die zugrunde liegenden Studien für die Entwicklung der Gas-Erzeugungskapazität spezifizieren nicht den Anteil der KWK-Kapazitäten. Wir nehmen an, dass der KWK-Anteil an der Gas-Erzeugungskapazität konstant bei 40 % liegt. Es wurden die Szenarien „Zielpfad“ aus BCG (2021) und „TN-Strom“ aus BMWi (2021b) zugrunde gelegt und „Bioenergie“ aus Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021) als potenzielle KWK-Kapazität berücksichtigt.

Die gasbasierte Stromerzeugungskapazität (inklusive Wasserstoff) steigt in allen untersuchten Studien. Damit steigen auch, unter Annahme eines konstanten KWK-Anteils an der Gas-Erzeugungskapazität, die potenziellen KWK-Kapazitäten auf 34 bis 45 GW in 2045. Insbesondere bei einem verstärkten Fokus auf Fernwärmeversorgung sowie auf einer effizienten Nutzung der klimaneutralen oder erneuerbaren Gase ist ein Anstieg der KWK-Kapazitäten wahrscheinlich.

4.3 Flexibilität aus KWK-Anlagen erschließen

Die Transformation zu einer klimaneutralen Energieversorgung in Deutschland erfordert in den Strom- und Wärmesystemen die Erschließung zusätzlicher steuerbarer Erzeugungskapazitäten (s. Kapitel 2 und 3):

- Im Stromsystem werden **zunehmend dargebotsabhängige Erzeugungstechnologien** eingesetzt. Diese sind nur einseitig steuerbar, können also bestenfalls im Fall eines Stromüberschusses gedrosselt bzw. abgeregelt werden.

- Die bestehenden beidseitig und flexibel steuerbaren Stromerzeugungskapazitäten werden durch den **Ausstieg aus der Kernenergie und Kohleverstromung** drastisch reduziert.
- Der **jährliche Strombedarf und die auftretenden Nachfragespitzen steigen** in den nächsten Jahren durch eine zunehmende Elektrifizierung vieler Anwendungen in den Sektoren Industrie, Verkehr und Gebäude voraussichtlich deutlich an. Zum Beispiel zeigt die Modellierung der dena-Leitstudie 2 [dena (2021a)] einen Anstieg des jährlichen Strombedarfs von 577 TWh in 2019 auf 829 TWh in 2045 und der inflexiblen Nachfragespitze von 77 GW in 2019 auf 107 GW in 2045.⁷⁴

KWK-Anlagen sind steuerbar und können systemdienlich eingesetzt werden, wurden jedoch in der Vergangenheit oft nicht auf Flexibilität ausgelegt

KWK-Anlagen sind grundsätzlich in der Lage, die **Produktion kurzfristig und flexibel** an äußere Bedingungen wie z. B. Strompreise oder lokale Stromüberschüsse oder -engpässe anzupassen. Dies gilt in besonderem Maße für Motor- oder Turbinen-KWK-Anlagen, deren Erzeugung sekundenschnell hoch- oder heruntergefahren werden kann. Die tatsächlich abrufbare Flexibilität von KWK-Anlagen im jeweiligen Einsatzkontext ist durch die Auslegung der Anlage und deren Peripherie (insbesondere Wärmespeicher und Wärmenetz), die weiteren verfügbaren Wärmeversorgungslösungen sowie das Profil des Wärmebedarfs geprägt.

In der Vergangenheit wurden KWK-Anlagen, gemäß der damaligen Zielsetzung, Stromerzeugung aus ungekoppelter Stromproduktion zu verdrängen und dadurch Umweltnutzen zu generieren, oft auf hohe Auslastung und nicht auf Flexibilität ausgelegt:

- In der **Fernwärme-, Objekt- und Quartiersversorgung** war die Auslegung insbesondere auf die Deckung des Wärmebedarfs der lokalen Wärmeabnehmer ausgelegt. Die Betriebsführung war entsprechend „wärmegeführt“.
- KWK-Anlagen in der **Industrie** waren so ausgelegt, dass große Teile des eigenen Wärme- und Strombedarfs gedeckt werden konnten. Diese Auslegungs- und Betriebsführungsweise verfolgte das Ziel einer hohen jährlichen Vollaststundenlaufzeit, und resultierte vorrangig aus Gründen der betriebswirtschaftlichen Optimierung.

KWK ist eine effiziente und mittelfristig klimaneutrale Residuallasttechnologie

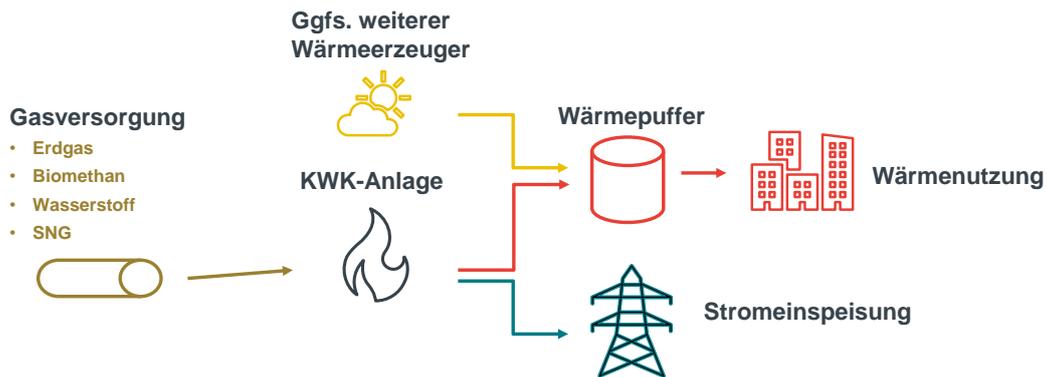
Durch die Berücksichtigung größerer Wärmespeichervolumina in der Konzeption der KWK-Wärmeversorgung, durch die Nachrüstung von Wärmespeichern in der Fernwärmeversorgung und/oder die Kombination mit weiteren Wärmeerzeugern, sind KWK-Anlagen jedoch noch besser steuerbar und können systemdienlich betrieben werden.

Auch in **Kombination mit anderen Erzeugungstechnologien**, die z. B. eine dargebotsabhängige Einspeisung haben (z. B. Solarthermie) oder eine variierende

⁷⁴ EWI (2021b).

Einspeiseleistung (z. B. Wärmepumpe, Power-to-heat-Anlage), kann die KWK ergänzend bzw. systemdienlich agieren (s. Beispiele zur iKWK in Kapitel 2.4). Die KWK-Anlagen stellen in diesem Fall nicht das ganze Jahr Strom oder Wärme zur Verfügung („Band“), sondern nur bei unmittelbarem wärme- oder stromseitigem Bedarf. Sie ist damit eine **flexible Residuallasttechnologie**, kurzfristig z. B. auf Basis von Erdgas und mittel- bis langfristig auf Basis von klimaneutralen Gasen.

Abbildung 30 Illustrative Konzeption einer KWK-Anlage zur systemdienlichen Fahrweise



Quelle: Frontier Economics

Konzeption der KWK-Anlage mit Fokus auf Residuallastdeckung

Die Konzeption von KWK-Anlagen zur systemdienlichen Fahrweise bedeutet, dass KWK-Anlagen, neben der Integration von Wärmespeichern, in ihrer maximalen Leistung größer dimensioniert werden. Während historisch die Leistung der KWK-Anlagen oft so ausgelegt wurde, dass die Anlage möglichst viele Stunden läuft, wird **bei einem Fokus auf Residuallastdeckung eine höhere Leistung der KWK-Anlage** gewählt, um dem Stromsystem Residuallast zur Verfügung zu stellen.⁷⁵

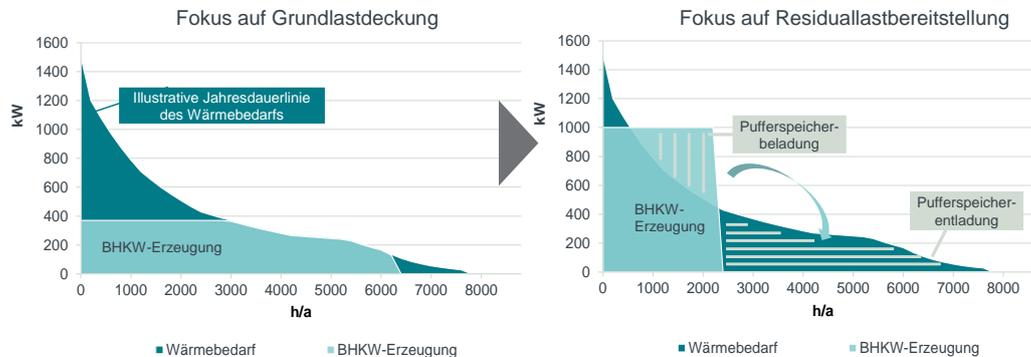
Zukünftig ist eine solche Auslegung auf geringere Vollbenutzungsstunden vor allem in der Öffentlichen Versorgung zu erwarten und wird mit dem Referentenentwurf des BMWK für eine EEG-Novelle in Form einer angestrebten Absenkung auf 2.500 Vollbenutzungsstunden im Jahr 2030 bereits angekündigt. In der Industrie, mit einem Fokus auf Eigenversorgung von Strom und Wärme, werden die KWK-Anlagen voraussichtlich auch zukünftig primär nach dem Bedarfsprofil der jeweiligen Industrieanwendungen eingesetzt werden. Auch in der Quartier- bzw. Objektversorgung werden bei einer lokalen Stromnutzung im Quartier die Volllaststunden gegebenenfalls langfristig höher als in der Öffentlichen Versorgung liegen.

Bei einer höheren Leistung (kW) der KWK-Anlage wird die Wärmereizzeugung, die in diesem Fall häufig größer als der zeitgleiche Wärmebedarf ist, **in einem Wärmepuffer zwischengespeichert** (Pufferspeicherbeladung). Wenn die KWK-Anlage nicht in Betrieb ist, jedoch Wärmebedarf besteht, wird die Wärme aus dem Pufferspeicher zur Verfügung gestellt (Pufferspeicherentladung).

⁷⁵ In Kapitel 5 gehen wir auf die bestehenden Anreize zur Flexibilisierung der KWK-Erzeugung ein.

Diese Betriebsweise impliziert, dass die KWK-Anlage **in weniger Stunden im Jahr in Betrieb** ist als bei einem Fokus auf Grundlastdeckung.

Abbildung 31 Illustrative Dimensionierung und Fahrweise einer systemdienlichen KWK-Anlagenkonzeption (Jahresbetrachtung)



Quelle: Frontier Economics

Zeitplan für die Flexibilisierung der bestehenden und neuen KWK-Anlagen

Die Transformation zur Erschließung der Steuerbarkeit der KWK-Technologie erfordert somit ein **angepasstes Wärmeversorgungs-Konzept** (inkl. zusätzlicher Wärmespeichervolumina), eine angepasste **Dimensionierung** (höhere KWK-Leistung) und eine angepasste **Fahrweise**. Zahlreiche Betreiber von Bestands-KWK-Anlagen haben bereits in die Steuerbarkeit ihrer Systeme investiert. Für nicht umgerüstete Anlagen muss das zukünftig noch erfolgen. Die Erhöhung der Steuerbarkeit der KWK-Technologie kann dabei sowohl im Bestand der KWK-Anlagen nachgerüstet werden, sowie als Konzept für zusätzliche KWK-Anlagen genutzt werden:

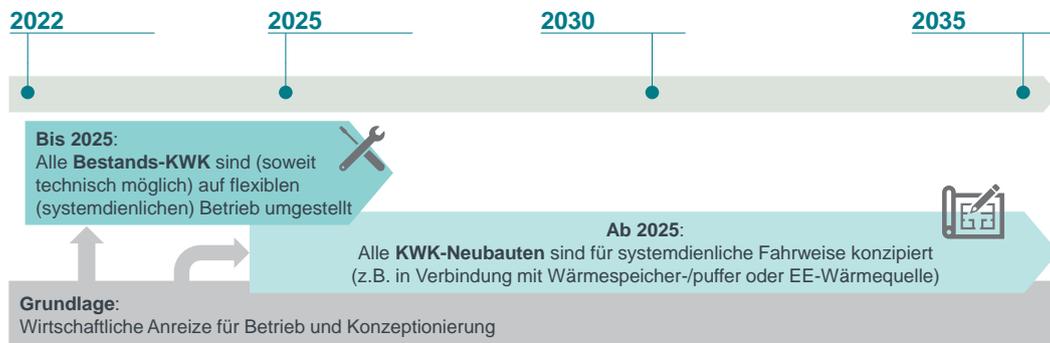
- **Bestands-KWK, die heute noch nicht steuerbar ist:** Für eine Erschließung der Steuerbarkeit von Bestands-KWK-Anlagen sollte, soweit technisch möglich und heute noch nicht systemdienlich eingesetzt, die Betriebsweise angepasst und ggfs. zusätzliche Wärmespeicher integriert werden. Die Anpassung der Betriebsweise und ggfs. Umrüstung mit zusätzlichen Wärmespeichern kann grundsätzlich in einer kurzen Frist unter der Voraussetzung, dass die Wirtschaftlichkeit hierfür gegeben ist bzw. durch Förderung geschaffen wird, vorgenommen werden.

Der Einsatz von KWK-Anlagen erlaubt vielen Industrieunternehmen, die benötigte Energie kosteneffizient und bedarfsgerecht zu beziehen. Dementsprechend folgt die Erzeugung von KWK-Anlagen in Industrieunternehmen in der Regel den Strom- bzw. Wärmebedarfen für die jeweiligen Industrieprozesse. Die Bereitstellung von Prozesswärme oder Strom für industrielle Prozesse und Anwendungen kann also bedeuten, dass die Unternehmens-spezifische rein „bedarfsdienliche“ Fahrweise nicht voll mit einer rein systemdienlichen Fahrweise übereinstimmt, sodass auch zukünftig zwischen diesen Betriebsweisen abgewogen werden muss.

- Bei **neuen KWK-Anlagen** kann eine systemdienliche Fahrweise in der Konzeptionierung berücksichtigt werden. Spätestens ab 2025 sollten, insofern es der Einsatzzweck erlaubt, neue KWK-Systeme eine hohe Steuerbarkeit

aufweisen. Die damit erreichte Systemdienlichkeit muss mindestens die bestehenden Anforderungen erfüllen.⁷⁶

Abbildung 32 Möglicher Transformationspfad zur Flexibilisierung der KWK



Quelle: Frontier Economics

Während die technische Fähigkeit von KWK-Anlagen für einen systemdienlichen Betrieb bei vielen Anlagen bereits heute oder in naher Zukunft besteht, müssen auch die **wirtschaftlichen Anreize** für eine entsprechende Fahrweise und Konzeptionierung geschaffen werden. Bislang besteht für den großen Teil der KWK-Anlagen allerdings nur ein geringer Anreiz zur stromsystemdienlichen Fahrweise. Siehe hierzu und zu möglichen Anpassungen der Rahmenbedingungen siehe Kapitel 5.2.

4.4 KWK schrittweise defossilisieren

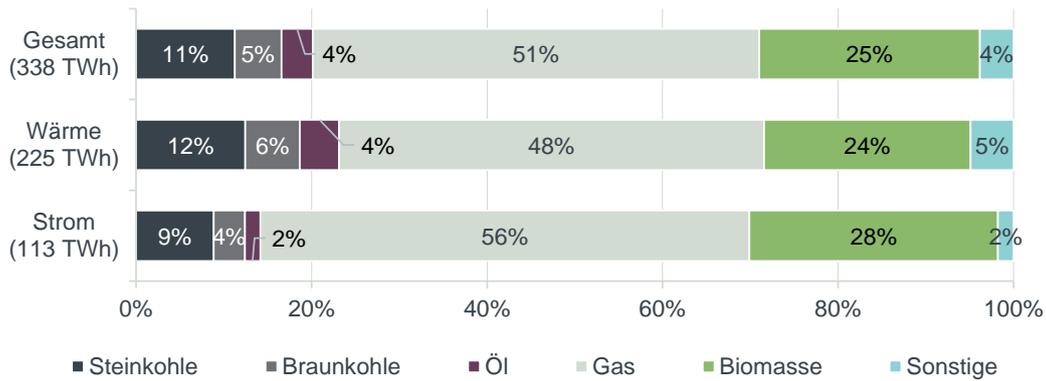
KWK beschreibt ein Funktionsprinzip, das auf unterschiedlichen Brennstoffen basieren kann und bei gleichbleibender Systemqualität mit klimaneutralen Brennstoffen betrieben werden kann.

Heute basiert KWK-Erzeugung noch überwiegend auf fossilen Energien

Der größte Anteil der KWK-Erzeugung, etwa 50 % des Wärme- bzw. Strom-Outputs, wird heute mit Erdgas betrieben (s. Abbildung 33). Danach folgt Biomasse (inkl. Folgeprodukte Biogas und Biomethan) mit einem Anteil von etwa 25 % an der KWK-Erzeugung. Etwa 20 % der KWK-Erzeugung basiert noch auf den Brennstoffen Steinkohle, Braunkohle und Öl.

⁷⁶ Vgl. § 9 EEG und Anforderungen aus Redispatch 2.0.

Abbildung 33 KWK-Erzeugung nach Energieträger (2019)



Quelle: Frontier Economics basierend auf UBA (2021c).

KWK kann kurzfristig Kohleerzeugung ersetzen und mittel- und langfristig vollständig auf Biomethan und Wasserstoff umgestellt werden

Die CO₂-Intensität der Strom- und Wärmeerzeugung von KWK-Anlagen ist abhängig vom eingesetzten Brennstoff. Im Folgenden stellen wir einen möglichen Pfad für die Defossilisierung der KWK-Erzeugung dar (s. Abbildung 34)⁷⁷:

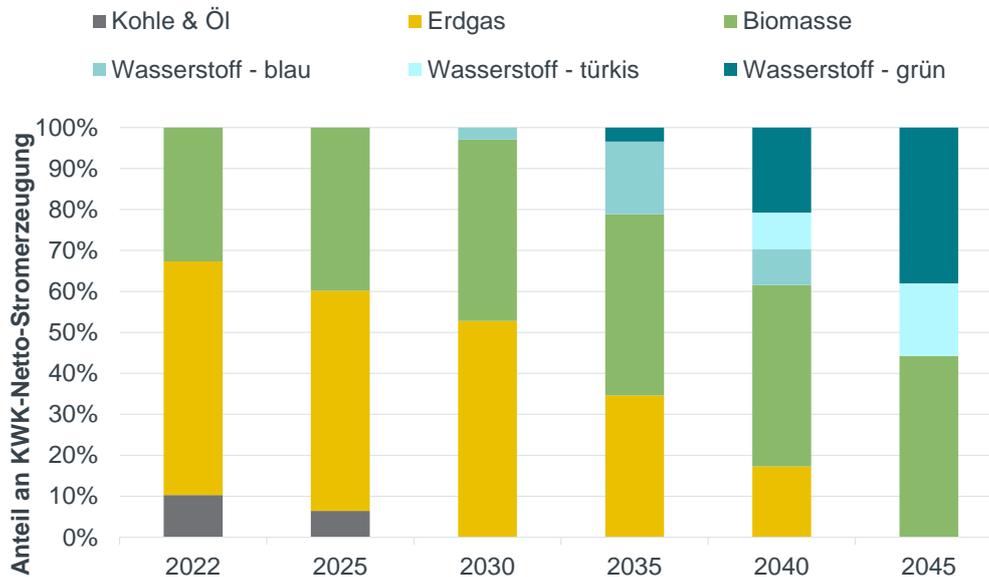
- Der Koalitionsvertrag der Bundesregierung sieht einen **Kohleausstieg bis „idealerweise“ 2030** vor.⁷⁸ Gemäß diesem Vorhaben scheiden voraussichtlich Braun- und Steinkohle sowie Öl (14 % der KWK-Erzeugung in 2019) aus der KWK-Erzeugung bis 2030 aus. Ein höherer Einsatz von Biomethan für die Erzeugung aus KWK-Anlagen kann die ausscheidenden Brennstoffe Kohle und Öl ersetzen, sodass bereits bis 2030 eine Reduktion der THG-Emissionen aus KWK-Erzeugung erreicht wird.
- Spätestens ab etwa **2030** wird der **Erdgaseinsatz in KWK-Anlagen reduziert**. Es werden zunehmend emissionsarme und klimaneutrale Gase wie Biomethan und Wasserstoff eingesetzt. Der Wasserstoffhochlauf wird unter anderem durch den Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine beschleunigt. Kurz- und mittelfristig wird dafür auch emissionsarmer blauer Wasserstoff eingesetzt.⁷⁹
- Bis spätestens **2045** wird Erdgas vollständig durch klimaneutrale Gase ersetzt. Neben Biomethan und grünem Wasserstoff wird langfristig möglicherweise auch türkiser Wasserstoff eingesetzt.

⁷⁷ Der Fokus der Beschreibung des Transformationspfads in diesem Kapitel liegt auf dem Energieträger-Mix, während die notwendigen politischen Handlungen in Kapitel 5 dargelegt werden.

⁷⁸ SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021).

⁷⁹ Das BMWK plant kurzfristig Beschaffung von blauem Wasserstoff, der jedoch langfristig durch grünen Wasserstoff ersetzt wird. (Quelle: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/03/20220321-bundesminister-robot-habeck-wasserstoff-zusammenarbeit-mit-den-vereinigten-arabischen-emiraten-ausbauen.html>).

Abbildung 34 Potenzielle Entwicklung des Energieträger-Mix der KWK-Stromerzeugung



Quelle: Frontier Economics

Der THG-Ausstoß der KWK-Erzeugung kann somit auf Basis gasförmiger Brennstoffe (Erdgas, Biogas/-methan, Wasserstoff) effektiv reduziert und bis 2045 eliminiert werden. Neben neuen KWK-Anlagen, die Wasserstoff-ready sind, können auch bestehende KWK-Anlagen kurzfristig defossilisiert werden, indem grünes Methan (Biomethan) an Stelle von fossilem Methan eingesetzt werden.

Der wesentliche Vorteil von KWK-Anlagen besteht dabei darin, dass sie die eingesetzten Brennstoffe durch gekoppelte Strom- und Wärmeerzeugung besonders effizient nutzen. Dies ist im Zuge der Bestrebungen zur Unabhängigkeit von russischem Erdgas aktuell wichtiger denn je. Auch mittelfristig wird die effiziente Nutzung für die in der Markthochlaufphase „knappen“ und voraussichtlich teureren emissionsarmen Energieträger Biomethan und Wasserstoff elementar sein.⁸⁰

Entscheidend für den eingeschlagenen Transformationspfad und die Umstellung auf emissionsarme und klimaneutrale Gase sind letztlich die energiepolitischen Rahmenbedingungen, die wirtschaftlichen Anreize und die Verfügbarkeit der Brennstoffe. Auf die Verfügbarkeit der Brennstoffe gehen wir nachfolgend ein, auf die energiepolitischen Rahmenbedingungen und wirtschaftlichen Anreize in Kapitel 5.3.

Verfügbarkeit emissionsarmer und klimaneutraler Brennstoffe

Die Verfügbarkeit der Brennstoffe (im Inland sowie durch Importe) sowie die Aufteilung zwischen den Sektoren und Anwendungen ist entscheidend für die in KWK-Anlagen eingesetzten Mengen an Biomethan und Wasserstoff:

⁸⁰ Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass in Folge der aktuellen Preisentwicklung im Gasgroßhandel Biomethan phasenweise günstiger beschafft werden kann als Erdgas.

- **Biomasse** und Folgeprodukte werden bereits heute zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Aus Biomasse aufbereitetes Biomethan gilt als direktes Substitut für fossiles Erdgas und kann im Gasnetz sowie in Erdgas-Anlagen direkt eingesetzt werden.
 - Das **Biomasse-Potenzial in Deutschland** ist bereits stärker als im internationalen Vergleich ausgeschöpft. Im Jahr 2020 wurden etwa 90 TWh Biogas (davon etwa 10 TWh nach Veredelung zu Biomethan) genutzt. Weitere Potenziale bestehen jedoch u. a. durch die Vorbehandlung aktuell kaum genutzter fester Biomasse (z. B. Lignocellulose, Holz, Stroh, Biomasse-Abfälle) sowie aus kommunalen, industriellen Abfällen, Reststoffen sowie tierischen Exkrementen. Zu deren Erschließung kann ein Großteil der bestehenden Biogasanlagen an Biomethan-Aufbereitungsanlagen angeschlossen werden. Das so gewonnene Biomethan kann dann in das Gasnetz eingespeist werden. Bis 2030 kann dadurch die Biomethaneinspeisung ins Gasnetz von heute 10 TWh/a auf ca. 100 TWh/a erhöht werden. Das langfristige heimische Potenzial für die Biomethan-Produktion wird auf bis zu 175 TWh/a Biomethan in 2050 geschätzt.⁸¹
 - Die **ausländischen Biomethan-Potenziale** sind z. T. deutlich größer (z. B. Frankreich, Italien) und übersteigen in einigen Ländern den voraussichtlichen Eigenbedarf (z. B. Skandinavien, Ukraine). Die Höhe potenzieller Importe nach Deutschland ist jedoch ungewiss durch die Unsicherheiten beim Produktionspotenzial, beim heimischen Bedarf und bei der Verteilung auf mögliche Exportländer. Die Studienergebnisse fallen daher sehr unterschiedlich aus und reichen für Schweden und Finnland z. B. von einem Produktionspotenzial von 80 TWh/a bis zu einem Exportpotenzial von 200 TWh/a.⁸²
- In Folge des russischen Angriffskrieges gegen die Ukraine ist Biomethan zudem noch stärker in den Fokus gerückt und soll mittelfristig stärker eingesetzt werden. **So sieht die REPowerEU-Strategie der Europäischen Kommission zur schnellstmöglichen Unabhängigkeit von russischem Erdgas zum Beispiel eine Verdoppelung des „Fit für 55“-Ziels für Biomethan bis 2030 auf 35 Milliarden Kubikmeter (etwa 340 TWh) pro Jahr vor.**⁸³
- Durch die **Bedarfe mehrerer Sektoren für emissionsarme Gase („Sektorkonkurrenz“)** besteht zudem eine weitere Unsicherheit bzgl. des Anteils der Biomasse bzw. Biomethan, der für KWK-Anlagen zur Verfügung stehen wird. Während das BMWK den primären Einsatz von Biomasse und Folgeprodukten in der stofflichen Nutzung sieht, gehen andere Studien von einer Nutzung von etwa 50 % der Biomasse für die Strom- und Wärmeerzeugung aus.⁸⁴

⁸¹ DVGW (2021), DVGW (2022). Weitere Studien kommen zu vergleichbaren Ergebnissen: Das Biomethan-Potenzial liegt gemäß dena (2017) bei 90 bis 118 TWh bis 2033 und gemäß BDEW (2019a) bei 100 TWh bis 2030 und 140 TWh bzw. 250 TWh bei Berücksichtigung von Energie-, Winterpflanzen und Zwischenfrüchten.

⁸² Guidehouse (2020), DVGW (2021), DVGW (2022).

⁸³ Europäische Kommission (2022b).

⁸⁴ BMWK (2022A), Guidehouse (2020).

- **Wasserstoff** nimmt in den Defossilisierungs-Szenarien für die deutsche und europäische Energieversorgung mittel- und langfristig eine prominente Rolle ein. Während die kurzfristige Verfügbarkeit von erneuerbarem oder emissionsarmem Wasserstoff voraussichtlich begrenzt ist, wird langfristig von einer hohen Verfügbarkeit von Wasserstoff in Europa ausgegangen.
 - Das Ziel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz für die **heimische Erzeugung** von Wasserstoff liegt bei 10 GW Elektrolyseleistung bzw. etwa 28 TWh/a bis 2030.⁸⁵ Bis 2045 könnte die Elektrolyseleistung in Deutschland auf etwa 25 bis 60 GW bzw. bis zu etwa 150 TWh/a steigen.⁸⁶ Die heimische Erzeugung von Wasserstoff auf Basis fossiler Energieträger und Abspaltung des CO₂ ist in Deutschland dagegen ungewiss. Dies gilt aufgrund der Notwendigkeit zur unterirdischen Speicherung von CO₂ insbesondere für „blauen“ Wasserstoff.⁸⁷
 - Das **Import-Potenzial** für Wasserstoff ist vor 2030 voraussichtlich gering, könnte jedoch bis 2045 stark zunehmen. Die langfristigen (2045) Produktionspotenziale in Europa könnten über 3.000 TWh/a betragen.⁸⁸ Zusätzlich besteht erhebliches Potenzial zum Import von Wasserstoff, der außerhalb von Europa produziert und per Pipelines oder Schiff nach Europa transportiert wird. Mit den Import-Potenzialen kann auch eine langfristig hohe Wasserstoff-Nachfrage in Deutschland gedeckt werden.⁸⁹
 - In der Markthochlaufphase für Wasserstoff wird voraussichtlich **Wettbewerb zwischen den Sektoren** bestehen. Grundsätzlich ist zu empfehlen, für einen erfolgreichen Wasserstoffhochlauf politische Vorfestlegungen zu vermeiden – soweit nicht für Infrastrukturplanungen zwingend erforderlich. Stattdessen müssen alle potenziellen Anwendungen effektiv um den Einsatz des Wasserstoffs konkurrieren können.

Bei adäquaten Rahmenbedingungen kann das Angebot an Wasserstoff sowohl in der Mittelfrist (bis etwa 2030) als auch in der Langfrist (bis etwa 2045) deutlich gesteigert werden. Zu diesem Schluss kommt auch eine aktuelle Studie von Frontier für DVGW (s. Abbildung 35).⁹⁰ Demnach besteht im Base Case 2030 ein Angebotspotenzial von etwa 290 TWh/a, welches bis 2045 etwa 850 TWh/a beträgt. Im Optimistischen Case liegen die Potenziale bei etwa 640 TWh/a bis 2030 und 2.230 TWh/a bis 2045.

⁸⁵ BMWK (2022A).

⁸⁶ Vgl. Fraunhofer ISE (2019), Agora Energiewende (2021), EWI (2021b), DVGW (2022).

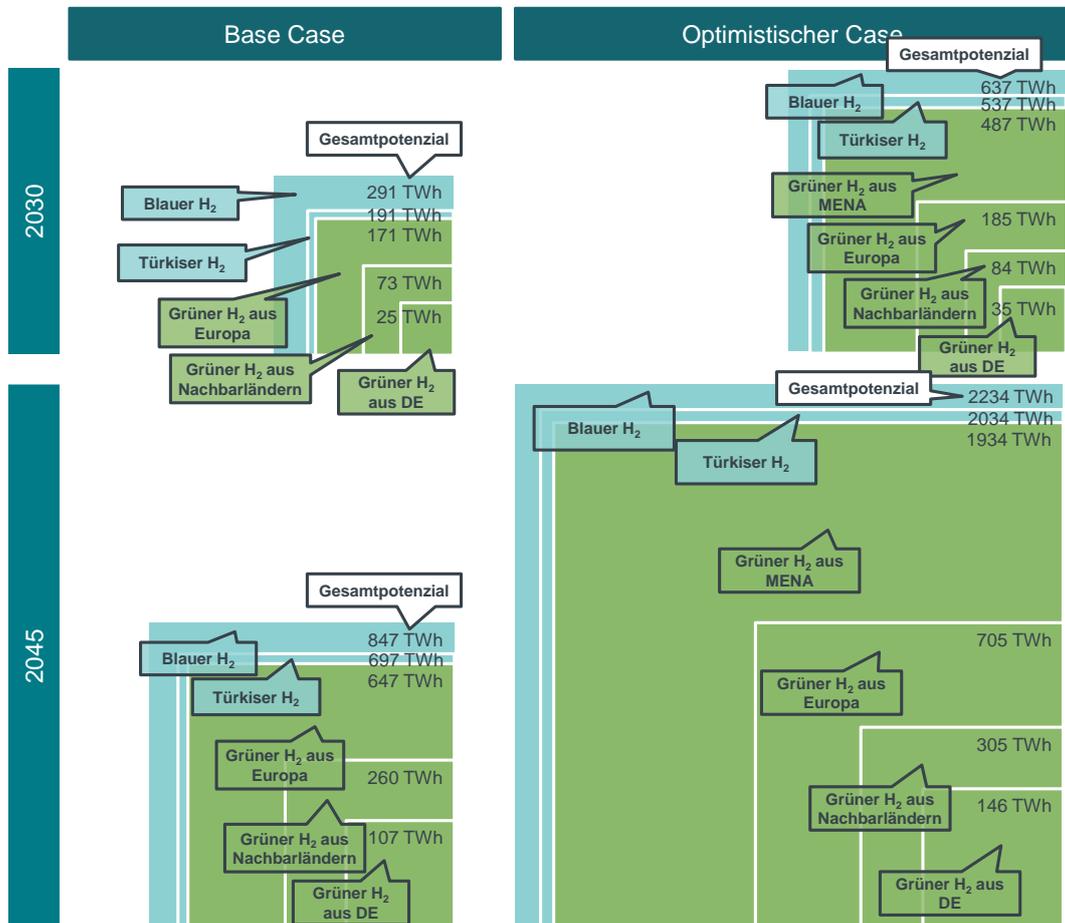
⁸⁷ Das Glossar enthält eine Definition der Wasserstoff-Farben.

⁸⁸ Hydrogen4EU (2021).

⁸⁹ DVGW (2022).

⁹⁰ DVGW (2022).

Abbildung 35 Potenziell verfügbare Wasserstoffmengen für Deutschland in 2030 und 2045



Quelle: DVGW (2022)

Auch bei Berücksichtigung der Kosten erreichen klimafreundliche Gase ein wettbewerbsfähiges Niveau: Blauer und türkiser Wasserstoff sowie der Einsatz von Biomethan erlauben bis 2030 bei 8 ct/kWh ein Potenzial von etwa 220 TWh/a. Bis 2045 kann bei 8 ct/kWh das Potenzial auf etwa 430 TWh/a gesteigert werden, vor allem durch die Erschließung von Importpotenzialen.⁹¹

Es gibt also eine Vielzahl von potenziellen Quellen, die technisch in naher Zukunft auf große Produktionsmengen ausgeweitet werden können. Dadurch scheint es realistisch, dass in der Zukunft klimafreundliche Gase in ausreichendem Maße verfügbar sein werden, sodass das Angebot an klimafreundlichen Gasen sowohl in der Mittelfrist (bis 2030) als auch in der Langfrist (bis 2045) ausreicht, um den Wasserstoffbedarf in Deutschland zu decken.

⁹¹ DVGW (2022).

5 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Im vorangegangenen Kapitel wurden der transformative Entwicklungsraum der KWK hin zu einem flexiblen und klimaneutralen Einsatz vorgestellt, insbesondere als Ergänzung zur Nutzung von erneuerbaren Energien und Umweltenergien (z. B. Abwärme).

Dort wurde darauf hingewiesen, dass Kernaspekte der Transformation der KWK von den energiepolitischen Vorgaben abhängen. In diesem Kapitel beleuchten wir nun näher, welche Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, um eine erfolgreiche Transformation der KWK umzusetzen, und

- den **Erhalt**, d. h. die Transformation inklusive **Zubau** von KWK sicherzustellen (Kapitel 5.1);
- die weitere **Flexibilisierung** der KWK voranzutreiben (Kapitel 5.2); und
- eine **Defossilisierung** von KWK zu erreichen (Kapitel 5.3).

Die Ausführungen sind dabei als Impulse für weitere Diskussionen und Analysen zu verstehen, eine detaillierte politische Umsetzungsempfehlung würde den Rahmen des vorliegenden Berichtes übersteigen.

5.1 Rahmenbedingungen zum Erhalt und Zubau von KWK

Wie in Kapitel 4.2 dargelegt stellen KWK-Anlagen mit einer Nettoerzeugung von 225 TWh/a Wärme und 110 TWh/a Strom etwa 17 % der benötigten Wärme und 22 % der gesamten Nettostromerzeugung in Deutschland zur Verfügung (Stand 2019). Zudem stellen KWK-Anlagen etwa 22 % der gesamten steuerbaren Erzeugungskapazität in Deutschland.

Im Zuge des Ausstiegs aus der Kernenergie und der Kohlestromerzeugung, der Zunahme fluktuierender Stromerzeugung aus Wind und Sonne, zunehmenden Engpässen im Stromnetz sowie dem schrittweisen Ausstieg aus der fossilen Wärmeerzeugung werden KWK-Anlagen zukünftig weiterhin eine wesentliche Rolle in der Strom- und Wärmeerzeugung einnehmen. Dementsprechend gilt es, die bestehenden KWK-Anlagen mindestens zu erhalten bzw. durch moderne gasbasierte KWK-Anlagen zu ersetzen – z. B. im Fall von Kohle-KWK. Mit Blick auf den erheblichen zu erwartenden Anstieg des Strombedarfs – auch und gerade in den Stromverteilnetzen durch die Zunahme von elektrischen Wärmepumpen und der Elektromobilität – ist zudem ein Zubau von KWK-Anlagen sinnvoll und erforderlich (siehe Kapitel 4.2).

Diese Notwendigkeit erkennt die Bundesregierung bereits in ihrem Koalitionsvertrag von November 2021 an:



Um den zügigen Zubau gesicherter Leistung anzureizen und den Atom- und Kohleausstieg abzusichern, werden wir in diesem Rahmen bestehende Instrumente evaluieren sowie wettbewerbliche und technologieoffene Kapazitätsmechanismen und Flexibilitäten prüfen. Dazu zählen u. a. gesicherte Erneuerbaren-Leistungen, **hocheffiziente Gaskraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung im Rahmen der Weiterentwicklung des entsprechenden Gesetzes**, ein Innovationsprogramm, um **H₂-ready Gaskraftwerke auch an Kohlekraftwerkstandorten anreizen** zu können, Speicher, Energieeffizienzmaßnahmen und Lastmanagement.

KOALITIONSVERTRAG ZWISCHEN SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN UND FDP (2021), S. 61

Die Umsetzung dieser Ziele erfordert entsprechende Rahmenbedingungen für Investoren und Betreiber, um über rentable und verlässliche Geschäftsmodelle den Bestand und Zubau von Kapazitäten anzureizen. Aufgrund des hohen Grades der Vernetzung der KWK mit fast allen energiepolitischen Themen ist dabei ein Zusammenspiel von verschiedenen Maßnahmen notwendig, um eine ausreichende Wirtschaftlichkeit sicherzustellen.

Stabiler Rechtsrahmen als Grundlage

Wesentliche Grundlage hierbei ist ein stabiler Rechtsrahmen: Das KWKG 2020 setzt die Rahmenbedingungen für die Förderung von neuen, modernisierten oder nachgerüsteten KWK-Anlagen, die bis zum Jahr 2026 in Betrieb gehen. Um hinreichende Sicherheit für weitergehende Investitionen zu schaffen, braucht es Klarheit über die Fortschreibung des KWKG. Denn unter Berücksichtigung der erforderlichen Vorlaufzeiten für den Bau von Kraftwerken besteht bereits für zeitnah angestoßene Investitionsvorhaben Unsicherheit über die relevanten Rahmenbedingungen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme. Der Rechtsrahmen muss im Sinne der Investitionssicherheit zudem möglichst stabil und langfristig sein, also nicht wie in der Vergangenheit sehr häufig und mit kurzer Umsetzungsfrist angepasst werden. Im Rahmen des Osterpakets vom 6. April 2022 hat die Bundesregierung unter anderem Änderungen am KWKG und dem EEG vorgeschlagen, welche erhebliche Relevanz für die Wirtschaftlichkeit der KWK besitzen. Einige dieser Regelungen, wie beispielsweise die vorgeschlagene Streichung der Förderung von Biomethan im KWKG, verschlechtern die Bedingungen für KWK-Anlagen jedoch erheblich und erzeugen Unsicherheit für potenzielle Investoren. Mit einem solchen Ausschluss von Biomethan in der KWK würde dem Gebäudesektor zudem eine wesentliche Option auf dem Weg zur Klimaneutralität genommen.

Über einen stabilen Rechtsrahmen als Grundlage hinaus wurden bei der Erarbeitung dieser Studie insbesondere die folgenden Bausteine für energiepolitische Maßnahmen identifiziert.

Marktgerechte Anreize für Investitionen in KWK

In einschlägigen Analysen wurde ein Bedarf von 23 GW⁹² bis zu 43 GW⁹³ an neuen wasserstofffähigen Gaskraftwerken bis 2030 identifiziert (siehe Kapitel 3.3). **Dies impliziert über den Zeitraum von 2021 bis 2030 einen jährlichen Zubau von etwa 2,5 bis 5 GW.**⁹⁴ Gemäß Koalitionsvertrag sollen für einen „zügigen Zubau gesicherter Leistung [...] hocheffiziente Gaskraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung“⁹⁵ zum Einsatz kommen. Auch in jüngeren Evaluierungen der KWK finden sich ambitionierte Zieleempfehlungen z.B. von einem KWK-Anteil an der regelbaren Stromerzeugung von 40-45% im Jahr 2030.⁹⁶ Um einen derartigen Zubau zu erreichen, bedürfte es zusätzlicher oder erweiterter Anreizmechanismen. Mögliche Ansätze könnten dabei sein:

- **Aufstockung der KWK-Ausschreibungsmengen** – Derzeit und bis 2025 beträgt die jährliche Ausschreibungsmenge für neue und modernisierte KWK-Anlagen 150 MW elektrische KWK-Leistung.⁹⁷ Für iKWK kommen weitere 50 MW hinzu.⁹⁸ Diese könnten – begleitet durch weitere der hier skizzierten Maßnahmen – ausgeweitet werden, zudem könnten auch kleinere Anlagen in die Ausschreibungen aufgenommen werden.
- **Kapazitätsmechanismen** – Bisher basiert das Strommarktdesign in Deutschland überwiegend auf dem Prinzip eines „Energy-Only-Marktes“. Dabei finanzieren sich Stromerzeugungsinvestitionen primär durch energiemengenabhängige Entgelte (in €/MWh), die eine implizite, aber keine explizite, Vergütung von Leistungsbereithaltung enthalten. Im Zuge von politisch forciertem Kern- und Kohleausstieg und des Zubaus fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung aus Wind und Sonne kommt derzeit die Diskussion wieder auf, inwieweit es eines zusätzlichen Kapazitätsmechanismus bedarf. Ein Kapazitätsmechanismus würde durch ergänzende Leistungszahlungen (z. B. in €/MW pro Jahr) für die Vor- und Bereithaltung gesicherter Kapazität gewährleisten, durch welche die Errichtung zusätzliche Kapazität und somit Versorgungssicherheit angereizt werden soll. Im Fall einer Einführung ist ein Kapazitätsmechanismus derart auszugestalten, dass er die Vorhaltung gesicherter Stromerzeugungsleistung auch durch KWK-Anlagen sowie deren Beitrag zur weiteren Flexibilisierung des Stromsystems adäquat entlohnt. Dies sollte neben großen KWK-Anlagen in der öffentlichen Versorgung und Industrieanlagen auch KWK-Anlagen in der Quartier- und Objektversorgung umfassen. Dies kann gelingen, indem kleine KWK-Anlagen – ggf. über Aggregatoren – auch direkt von

⁹² Siehe EWI (2021), S. 11. Agora (2021) und EWI (2021b) kommen auf einen Zubaubedarf von Gaskraftwerken von 19 GW bzw. 15 GW zwischen 2018/2019 und 2030, modelliert allerdings auch (wegen der Publikationszeitpunkte im April und Oktober 2021 und somit vor Veröffentlichung des Koalitionsvertrages) noch keinen Kohleausstieg bis 2030.

⁹³ Siehe BCG (2021), S. 162.

⁹⁴ Dies gilt unter der vereinfachten Annahme eines linearen Zubaupfades von 2021 bis 2030. Dies ist konservativ gerechnet, denn faktisch sind bei der Bundesnetzagentur derzeit nur 3,6 GW an Neubauvorhaben gemeldet, siehe Bundesnetzagentur (2021c) bzw. Kapitel 3.3. Aufgrund der mehrjährigen Vorlaufzeiten ist in der Praxis daher mit einem späteren und dann steileren Zubaupfad zu rechnen, wenn die identifizierten Neubaubedarfe bis 2030 erreicht werden sollen.

⁹⁵ SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP (2021), S. 61.

⁹⁶ Siehe Prognos, Fraunhofer IFAM, Öko-Institut, BHKW-Consult, Stiftung Umweltenergierecht (2019), S. 207.

⁹⁷ Siehe § 8a KWKG i.V.m. §3 Absatz 2 Nr. 2a KWK-Ausschreibungsverordnung – KWKAusV.

⁹⁸ Siehe § 8b KWKG i.V.m. §3 Absatz 2 Nr. 2b KWK-Ausschreibungsverordnung – KWKAusV.

Kapazitätzahlungen profitieren, oder indirekt die durch dezentrale KWK ermöglichte flexible Stromausspeisung aus dem Netz entlohnt wird.

Genehmigungsverfahren beschleunigen, Bürokratie reduzieren

Der Zeitdruck zum Ausbau von wasserstofffähigen Gaskraftwerken ist erheblich, bisher sind jedoch nur wenige Neubauten in Planung. Um einen zügigen Zubau zu realisieren, sind – neben der Schaffung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen – auch die bürokratischen Hürden abzubauen. Entsprechend sollten Genehmigungsverfahren stark beschleunigt werden, unter anderem an Standorten zum Ersatz von kohlebasierten durch gasbasierte KWK-Anlagen. Im Osterpaket der Bundesregierung finden sich hierzu noch keine Vorschläge. Die Bundesregierung hat diese allerdings für das geplante Sommerpaket angekündigt.

Des Weiteren müssen rechtliche Vorgaben insbesondere für KWK-Anlagen in der Quartiersversorgung vereinfacht und harmonisiert werden. Allein der bisher nicht einheitlich definierte Begriff des Quartiers – z. B. bezüglich der Anforderungen an den räumlichen Zusammenhang – in den verschiedenen relevanten Gesetzen (z. B. KWKG, EEG, GEG oder StromStG) führt zu Unsicherheiten in der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und der vertraglichen und technischen Umsetzung.⁹⁹

Ausbau von Wärmenetzen

Insbesondere in Ballungsräumen stellen Wärmenetze eine effiziente Wärmeversorgungslösung dar. Im Fall von Fernwärmenetzen wird zudem durch zentralisierte Wärmeerzeugung der Wechsel des Energieträgers zu emissionsarmen Energieträgern gegenüber individuellen Wärmeerzeugern vereinfacht.

Es sollten die politischen Rahmenbedingungen geschaffen werden, dass dort, wo es sinnvoll und effizient ist, Wärmenetze ausgebaut werden. Hierzu kann die kommunale Wärmeplanung als Instrument für strategische Planungs- und Investitionsentscheidungen in Bezug auf die Wärmeversorgung einen Beitrag leisten. Während dieses Instrument in Deutschland derzeit noch überwiegend auf freiwilliger Basis und mit nicht standardisierten Methoden durchgeführt wird, ist dies zukünftig flächendeckend zum Einsatz zu bringen. Hierzu hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) bereits angekündigt, gemeinsam mit den Ländern einen gesetzlichen Orientierungsrahmen (Gesetz für kommunale Wärmeplanung) zu schaffen, der den Akteuren vor Ort angesichts langer Investitionszyklen bei Infrastruktur, Wärmeerzeugung und Gebäuden mehr Planungs- und Investitionssicherheit gibt.¹⁰⁰ Dieses muss in einem technologieoffenen Wettbewerb sicherstellen, dass die KWK auch in Zukunft ihre Stärken entsprechend einbringen kann.

Die Bundesregierung plant mit der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) zudem ein neues Programm, um den Umstieg auf erneuerbare Energien und die Nutzung industrieller Abwärme in Wärmenetzen anzureizen. Auch hier wird wichtig sein, ein Level-Playing-Field zwischen verschiedenen erneuerbaren Energieträgern zu schaffen und einen technologieoffenen Wettbewerb

⁹⁹ Siehe für eine ausführliche Beschreibung der rechtlichen Rahmenbedingungen dena (2021b) und für eine Darlegung der Schwachstellen der Rahmenbedingungen dena (2022).

¹⁰⁰ BMWK (2022A), S. 29.

zuzulassen, z.B. auch durch Anerkennung von Biomethan als regenerativen Energieträger.

Sachgerechte Reflektion von Systemkosten und -nutzen

Der Marktrahmen ist grundsätzlich so zu gestalten, dass potenzielle Investoren in Energieanlagen die Kosten dieser Anlagen für das Energiesystem bzw. die Volkswirtschaft tragen. Analog müssen Investoren für die mit den Anlagen verbundenen Vorteile für das Energiesystem bzw. die Volkswirtschaft entlohnt werden. Im Fall der KWK bedeutet dies konkret:

- **Berücksichtigung der Primärenergieeinsparungen von KWK** – Bei der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen wird die eingesetzte Energie – unabhängig ob noch fossil oder bereits erneuerbar – optimal genutzt. Entsprechend wird gegenüber einer getrennten Strom- und Wärmeerzeugung Primärenergie und damit CO₂ eingespart. Zudem wird zusätzliche Primärenergie und CO₂ eingespart, wenn statt eines fossilen Energieträgers teilweise oder vollständig erneuerbare Energieträger eingesetzt werden. Diese Einsparungen müssen bei allen diesbezüglich relevanten Instrumenten Berücksichtigung finden. Beispielsweise müssen Brennstoffe bei der energetischen Bilanzierung von Gebäuden mit angemessenen Primärenergiefaktoren und Emissionsfaktoren eingehen. Im derzeitigen Gebäudeenergiegesetz (GEG) fehlen solche energetischen Kennwerte bisher jedoch für Wasserstoff. Diese gilt es in der anstehenden GEG-Novelle aufzunehmen.
- **Faire Bepreisung von CO₂-Emissionen** – Ebenfalls muss sichergestellt sein, dass CO₂-Emissionen von KWK und deren Wettbewerbstechnologien adäquat und diskriminierungsfrei bepreist sind. Das Nebeneinander von Europäischem Emissionshandelssystem (EU ETS) für Energiewirtschaft und Industrie auf der einen Seite, und nationalem Emissionshandel (nETS) für Wärme und Verkehr gemäß Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) auf der anderen Seite, birgt insofern besondere Risiken für die Sektorkopplungstechnologie KWK. Denn die KWK ist potenziell von beiden Emissionshandelssystemen betroffen, z.B. wenn ein dem EU ETS unterliegender KWK-Anlagenbetreiber Brennstoffe einsetzt, die dem BEHG unterliegen. Hierdurch kann es zu Doppelbelastungen und Wettbewerbsverzerrungen kommen.
 - **Langfristig** ist aus ökonomischer Perspektive eine **Integration der Sektoren Gebäudeenergie und Verkehr in das EU ETS** anzustreben. Somit können internationale und intersektorale Verzerrungen minimiert werden, und es kann sichergestellt werden, dass dort CO₂ eingespart wird, wo dies am günstigsten möglich ist.
 - **Kurzfristig** -muss sichergestellt werden, dass **Doppelbelastungen und Verzerrungen eliminiert** werden. Beispielsweise bedarf es eines Mechanismus zur nachträglichen Kompensation der unter dem BEHG gezahlten CO₂-Kosten für den Fall, dass ein dem EU ETS unterliegender KWK-Anlagenbetreiber Brennstoffe einsetzt, die dem BEHG unterliegen.¹⁰¹

¹⁰¹ Zusätzlich zu der bereits in § 7 Absatz 5 BEHG geschaffenen Möglichkeit des Vorabzugs, im Rahmen dessen der BEHG-Verantwortliche für die an EU-ETS- Anlagenbetreiber gelieferte Brennstoffemissionsmenge keine Emissionszertifikate erwerben und abgeben muss. Denn ein solcher Vorabzug ist nur unter einer

- **Berücksichtigung netzentlastender Funktion** – Zudem muss bei der anstehenden Reform des Systems aus Netzentgelten, Abgaben, Umlagen und Steuern der Netzentlastung durch – insbesondere dezentrale – KWK-Anlagen Rechnung angemessen getragen werden (siehe hierzu Kapitel 5.2)

5.2 Rahmenbedingungen zur Flexibilisierung von KWK

Es ist zukünftig ein erheblich zunehmender Bedarf nach steuerbaren Erzeugungsanlagen zur Ergänzung dargebotsabhängiger erneuerbarer Erzeugungskapazitäten für Strom und Wärme zu erwarten. KWK-Anlagen sind grundsätzlich in der Lage, die Strom- und Wärmeproduktion kurzfristig und flexibel an äußere Bedingungen wie z. B. Strompreise, lokale Stromüberschüsse oder -engpässe oder variierender Wärmeinspeisung anzupassen. Das Ausmaß der Steuerbarkeit von KWK-Anlagen ist insbesondere von der Auslegung der Anlage und ihrer Peripherie, sowie der wirtschaftlichen Anreizstruktur geprägt. Um einen effektiven Beitrag zur Versorgungssicherheit im Stromsystem zu leisten, muss insbesondere eine stromsystemdienliche Fahrweise der KWK-Anlagen durch entsprechend angepasste Rahmenbedingungen ermöglicht und angereizt werden.

Historische Auslegung von KWK primär auf lokalen Wärmebedarf

Historisch wurden KWK-Anlagen allerdings auf hohe Auslastung und nicht auf Flexibilität ausgelegt. Diese Auslegung und Fahrweise war Resultat des Energiesystems ohne nennenswerte dargebotsabhängige Stromerzeugung, in welchem der Flexibilitätsbedarf durch schwankenden Stromverbrauch problemlos durch Kernkraft-, Kohle- und Gaskraftwerke gedeckt werden konnte. Entsprechend wurden insbesondere KWK-Anlagen der öffentlichen Versorgung primär auf den Wärmebedarf der versorgten Kunden ausgelegt und nicht auf den Strombedarf. Dies war entsprechend in der KWK-Förderung reflektiert: Die stromseitige Entlohnung und Förderung der KWK-Anlagen bestand und besteht bis heute in einer reinen Betriebsförderung. Also in einer Zahlung von Cent pro kWh erzeugten Stroms, deren Höhe in vielen KWK-Anwendungsfällen weitgehend unabhängig von der aktuellen Situation im Stromsystem ist:

- Die eigentliche KWK-Förderung, also die Zuschlagszahlung für KWK-Strom gemäß §§ 5-7 KWKG, ist eine konstante Zahlung in Cent pro kWh. Dies gilt für alle KWK-Anlage gleichermaßen. Einzig im Fall negativer Strompreise an der Börse entfällt der KWK-Zuschlag inzwischen, um die Stromproduktion aus KWK-Anlagen in Überschusssituationen nicht anzureizen.
- Inwieweit die Vergütung des Stroms selbst die Situation im Stromsystem reflektiert und somit Anreize zu systemdienlicher Betriebsweise generiert, unterscheidet sich je nach KWKG-Vermarktungsvariante:

Reihe von Voraussetzungen möglich. Unter anderem erfordert er eine privatwirtschaftliche Vereinbarung zwischen dem EU-ETS-Anlagenbetreiber und dem BEHG-verantwortlichen Lieferanten. Für die Fälle, in denen eine solche Vereinbarung nicht zu Stande kommt – was z. B. die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) als in der Praxis häufig vorkommende Konstellation ansieht [siehe DEHSt (2022), S. 27] – sollte die Möglichkeit einer nachträglichen Kompensation der unter dem BEHG gezahlten CO₂-Kosten möglich sein.

- Im Fall von kleineren Anlagen (< 100 kW) kann die Vergütung des ins öffentliche Netz eingespeisten Strom als „üblicher Preis“ erfolgen. Dieser ergibt sich als der durchschnittliche Preis für Grundlaststrom an der Strombörse European Energy Exchange (EEX) in Leipzig im jeweils vorangegangenen Quartal. Dieser spiegelt also keinesfalls die aktuelle Situation im Strommarkt bzw. Stromsystem wider.
- Im Fall von gemäß § 4 Absatz a und b KWKG 2020 direkt vermarktendem bzw. Eigenbedarf deckendem KWK-Betrieb kann es zu dezidierten Anreizen zur stromseitigen Flexibilisierung kommen.
 - Dies gilt für KWK-Anlagen > 100 kW_{el}, die zur Direktvermarktung verpflichtet sind, weshalb einige große KWK-Anlagen ihren Strom bereits am Großhandelsmarkt vermarkten und entsprechend strommarktorientiert geführt werden.
 - Zudem wählen viele kleinere KWK-Anlagen der Objekt- und Quartiersversorgung freiwillig die Direktvermarktung, z. B. um den Strom als Mieterstrom vor Ort zu vermarkten. Der in diesen Anlagen erzeugte Strom wird also nicht gegen Vergütung des „üblichen Preises“ in das öffentliche Stromnetz eingespeist, sondern soweit möglich vor Ort verbraucht, da dieser Verbrauch von Netzentgelten und Stromsteuern befreit ist. Entsprechend wird auch dort bereits heute versucht, die Stromerzeugung auf den lokalen Strombedarf abzustellen, womit das Stromsystem im Vergleich zu einer zentralen Stromerzeugung entlastet wird.

Im Zuge der Transformation des Energiesystems zur Klimaneutralität muss die KWK-Förderung daher schrittweise an die sich ergebenden Anforderungen in einem auf erneuerbaren Energien basierten System angepasst werden.

Erste Schritte für Anreize zur Flexibilisierung von KWK-Anlagen wurden bereits getätigt

Mit der KWKG-Novelle von Juli 2020 wurde ein Schritt hin zu Anreizen zu einer stromsystemdienlichen Fahrweise von neuen, modernisierten oder erweiterten KWK-Anlagen eingeführt.¹⁰² Durch eine Begrenzung der maximalen jährlichen Vollbenutzungsstunden ist die Gesamtfördersumme zwar unverändert geblieben. Allerdings kann die Zahlung der Fördersumme nach KWKG (2020) nur noch in Grenzen beschleunigt werden, wodurch eine Hürde zur Flexibilisierung der Betriebsführung reduziert wurde:

- **Vor der Novelle von 2020** bestand insbesondere für KWK-Anlagen in der öffentlichen Versorgung ein Anreiz, die über eine begrenzte Anzahl Vollbenutzungsstunden ausgezahlte KWK-Zuschlagszahlung möglichst schnell zu erhalten: Je höher die Vollbenutzungsstunden pro Jahr, in desto kürzerer Zeit konnte die Gesamtförderung eingestrichen werden, mit positiven Auswirkungen zum Beispiel auf die Finanzierungskosten. Im Beispiel einer neuen KWK-Anlage, in der die Förderzahlung auf insgesamt 30.000 Vollbenutzungsstunden beschränkt war, konnte die Gesamtförderung also im „Extremfall“ von jährlich

¹⁰² Bereits mit dem EEG 2012 wurden durch Einführung der „Flexibilitätsprämie“ (seit 2014 „Flexibilitätszuschlag“) für einen Teil der Betreiber von Biogas- und Biomethananlagen ein Anreiz geschaffen, ihre Leistung bedarfsorientiert erzeugen bzw. einspeisen.

8.000 Vollbenutzungsstunden in weniger als 4 Jahren vollständig erlöst werden. Eine Reduktion der Stromproduktion zur Systemstützung hatte somit diesbezüglich negative kommerzielle Folgen, da es die Auszahlung des KWK-Zuschlags verzögerte.

- **Durch die Novelle von 2020** sind diese Anreize teilweise abgemildert: Ab 2025 erhält jede KWK-Anlage KWK-Zuschlagszahlungen für maximal 3.500 Vollbetriebsstunden pro Jahr. Die Gesamtförderung über 30.000 Vollbenutzungsstunden wird also ohnehin über mindestens 8,6 Jahre ausgezahlt, eine Beschleunigung darüber hinaus ist nicht mehr möglich.¹⁰³ Solange eine KWK-Anlage in einem Jahr mehr als 3.500 Vollbetriebsstunden läuft, bedingt eine Reduktion der Stromproduktion z. B. zur Systemstützung also keine Verzögerung der Auszahlung des KWK-Zuschlags mehr. Damit ist eine Hürde zur Flexibilisierung von KWK-Erzeugung zumindest adressiert.

Zukünftig braucht es verstärkte Anreize für flexible Auslegung und Fahrweise von KWK

Nach vorne gerichtet werden verstärkte Anreize für eine flexible Auslegung und Fahrweise von KWK-Anlagen erforderlich sein, um sicherzustellen, dass KWK-Anlagen zusätzliche Beiträge zu den Flexibilitäts-Anforderungen des Energiesystems leisten können.

Im Rahmen der Erarbeitung der Studie wurden dabei insbesondere folgende Bausteine identifiziert.

KWK-Förderung verstärkt auf Flexibilisierung auslegen

Ein unmittelbarer Ansatzpunkt zur Flexibilisierung von KWK ist eine Anpassung des Fördermechanismus, also des KWKG. Ziel sollte dabei sein, Anreize sowohl für eine auf höhere Flexibilität ausgerichtete Anlagen-Auslegung (inklusive großer Wärmespeichervolumina) als auch eine stromsystemdienliche Fahrweise zu generieren.

Exemplarisch seien nachfolgend verschiedene Möglichkeiten zur Anpassung des Fördermechanismus genannt. Diese sollten einer sorgfältigen Kosten-Nutzen-Abwägung unterzogen werden, welche nicht Bestandteil dieser Studie ist.

- **Weitere Beschränkung der jährlichen Vollbenutzungsstunden** – Die ab 2025 geltende Grenze von 3.500 Vollbenutzungsstunden setzt weiterhin Anreize, die Anlage auf mindestens 3.500 Vollbenutzungsstunden pro Jahr – also etwa 40 % Auslastung – zu fahren. Mit zunehmenden Anteilen von erneuerbarem Strom aus Wind und Sonne könnte erwogen werden, die Anzahl der jährlichen Vollbenutzungsstunden von KWK weiter zu senken, und die Stromerzeugung der KWK-Anlagen zunehmend als Backup für wind- und sonnenarme und/oder laststarke Perioden zu verwenden. Der neue KWKG-Regelungsvorschlag im Osterpaket sieht tatsächlich vor, dass die förderfähigen jährlichen Vollbenutzungsstunden bis 2030 auf 2.500 h/a abgesenkt werden sollen.¹⁰⁴

¹⁰³ Siehe für eine Übersicht hierzu z. B. B.KWK (2020).

¹⁰⁴ BMK (2022b).

Allerdings wären bei einer solchen Absenkung einige Aspekte zu berücksichtigen:

- Damit die mit dem Strom zeitgleich erzeugte Wärme weiterhin sinnvoll zur Bedienung der Wärmenachfrage genutzt werden kann, bedürfte es entsprechend größerer Wärmespeicher. Dies müsste bei der Bestimmung des KWK-Zuschlags berücksichtigt werden.
- Zudem wäre eine solche Regelung differenziert für verschiedene KWK-Anwendungsbereiche und ggfs. in Abhängigkeit der Stromverteilnetz-situation auszugestalten: Beispielsweise ist eine weitere Absenkung der Vollbenutzungsstunden für KWK-Anlagen in der Objekt- und Quartiersversorgung nicht per se sinnvoll. Denn bei dieser Versorgungsaufgabe sind die verfügbaren Aufstellflächen für Wärmespeicher häufig begrenzt, zudem beschränkt eine Absenkung der Vollbenutzungsstunden auch die Entlastungspotenziale für die Stromverteilnetze in den Quartieren.
- Des Weiteren wäre zu erwägen, Beschränkungen von Vollbenutzungsstunden nicht starr pro Jahr zu gestalten, sondern gewisse Verschiebungen zwischen den Jahren zu ermöglichen. Auf diese Weise könnte z.B. in wind-schwachen Jahren mehr Stromerzeugung in KWK-Anlagen beanreizt werden, in windstarken hingegen weniger.
- Nicht zuletzt wäre auf einen hinreichenden zeitlichen Vorlauf zwischen An-kündigung einer Absenkung der maximalen Vollbenutzungsstunden und Wirksamkeit zu achten, damit Anlagenkonzeptionen auch entsprechend ausgelegt werden können. Beispielsweise vergehen für größere Erzeu-gungseinheiten zur Fernwärmeversorgung in Großstädten und Ballungs-räumen zwischen Konzeptverabschiedung und Inbetriebnahme meist min-destens 5-6 Jahre. Signifikante Änderungen der Vollbenutzungsstunden nach Konzeptverabschiedung können dann nicht mehr berücksichtigt werden und haben entsprechende Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit.
- **Umstellung der KWK-Förderung auf Leistungszahlung oder kombinierte Leistungs- und Betriebszahlung** – Alternativ ist für KWK-Anlagen in der öf-fentlichen Versorgung und in der Industrie, aber nicht in der Objekt- und Quar-tiersversorgung, auch denkbar, das Fördersystem in Richtung einer Zahlung der vorgehaltenen elektrischen Leistung umzustellen. Dies würde ermöglichen, die zusätzlichen Investitionskosten und ggf. höheren Betriebskosten einer KWK-Anlage gegenüber einer Anlage zur reinen Stromerzeugung zu decken. Der KWK-förderseitige Anreiz zur Stromproduktion würde jedoch ganz oder teilweise entfallen, wodurch höhere Anreize generierbar wären, die Anlage stromsystemdienlich zu fahren. Um diese Anreize zu generieren, wären aller-dings geeignete Mechanismen zu implementieren, um sicherzustellen, dass die Anlagen auch tatsächlich im Fall eines Stromsystembedarfs verfügbar sind.
- **KWK-Direktvermarktung** – Neben der Ausgestaltung der KWK-Zuschlags-zahlung hat auch die Form der Vergütung des eigentlichen Stromwertes einen großen Einfluss auf die Anreize zur Flexibilisierung und stromsystemdienlichen Fahrweise. Wie ausgeführt hat ein direkt vermarktender KWK-Anlagenbetrei-ber auch heute schon Anreize, auf die Signale am Strommarkt zu reagieren und wenn möglich, zusätzlich Systemdienstleistungsprodukte anzubieten.

Bisher sind aber nur Anlagen ab einer Größe von 100 kW zur Direktvermarktung verpflichtet. Alle kleineren Anlagen können freiwillig in die Direktvermarktung optieren oder – für nicht selbst verbrauchte Mengen – eine kaufmännische Abnahme durch den Netzbetreiber zum „üblichen Preis“ verlangen. Eine Verringerung der Schwelle zur Direktvermarktungsverpflichtung würde den Kreis der KWK-Anlagenbetreiber, die am Strommarkt tätig sind, erhöhen. Allerdings sind bei einer Entscheidung über diese Schwelle die administrativen Kosten einer Direktvermarktung bei Kleinanlagen entgegenzuhalten. Daher ist nicht davon auszugehen, dass eine signifikante Absenkung der Schwelle zur Direktvermarktungsverpflichtung (z.B. unter 50 kW) sinnvoll ist.

Zudem könnten Geschäftsmodelle für lokale Stromvermarktung gefördert werden. Denn für viele kleine KWK-Anlagen in der Objekt- und Quartiersversorgung bietet sich grundsätzlich weniger eine Vermarktung am Stromgroßhandel an, sondern über Mieterstromlösungen, die den erzeugten Strom innerhalb der elektrischen Kundenanlage vermarkten. Da die Zuschläge hier jedoch häufig zu gering sind bzw. die Abwicklungsprozesse hinter diesen Geschäftsmodellen aufwändig sind, werden für diese Anlagen häufig wärmegeführte BHKW gewählt. Dann wird der dezentral erzeugte Strom einfach in das Netz der allgemeinen Versorgung gegen Zahlung des „üblichen Preises“ eingespeist.¹⁰⁵

Aufstockung der iKWK-Ausschreibungsmengen und Anpassung der Größe der förderfähigen iKWK

Mit Ausschreibungen für iKWK wurde ein Instrument zur Förderung innovativer und flexibler KWK-Systeme geschaffen. Derzeit und bis 2025 beträgt die jährliche Ausschreibungsmenge für iKWK allerdings nur 50 MW.¹⁰⁶ Zudem ist die iKWK-Förderung auf KWK-Anlagen ab einer Größe von 1 MW beschränkt.¹⁰⁷ Die iKWK-Ausschreibungen könnten auf kleinere Anlagen ausgeweitet und deren Ausschreibungsvolumen erhöht werden. Im Osterpaket der Bundesregierung ist bereits eine Ausweitung auf Anlagen ab 500 kW vorgesehen.

Zudem sollte erwogen werden, die heute häufig als Umsetzungsbarrieren wirkenden Umsetzungsfristen für iKWK-Lösungen zu verlängern, und bürokratische Hürden möglichst abzubauen. Auf diese Weise können verstärkt innovative und flexible KWK-Konzepte ins Leben gerufen und somit das Stromsystem unterstützt werden.

Berücksichtigung netzentlastender Funktion von dezentraler und systemdienlicher KWK-Erzeugung

Im Zuge zunehmender Elektrifizierung im Wärme- und Verkehrssektor wird der Strombedarf insbesondere in Ballungsräumen deutlich zunehmen. Anders als z. B. bei Gaskraftwerken „auf der grünen Wiese“, deren Stromerzeugung erst im Stromübertragungsnetz transportiert und dann in den Stromverteilnetzen weiterverteilt werden muss, entlastet lastnahe Stromerzeugung durch dezentrale KWK-Anlagen

¹⁰⁵ Siehe hierzu z.B. dena (2021b), Kapitel 2 bis 4.

¹⁰⁶ Siehe § 8b KWKG i. V. m. § 3 Absatz 2 Nr. 2b KWK-Ausschreibungsverordnung – KWKAusV.

¹⁰⁷ Siehe § 5 Absatz 2 KWKG i.V.m. § 1 Abs. 1 KWKAusV.

(z. B. in der Objekt- oder Quartiersversorgung) das Stromnetz.¹⁰⁸ Dies gilt in besonderem Maße durch die hohe Gleichzeitigkeit des Strombedarfs für elektrische Wärmepumpen und der Stromerzeugung aus KWK-Anlagen. Bei der anstehenden Reform des Systems aus Netzentgelten, Abgaben, Umlagen und Steuern sollte dieser Netzentlastung angemessen Rechnung getragen werden. Eine Möglichkeit der Entlohnung dieser Stromnetzentlastung bestünde in einer Wiedereinführung der vermiedenen Netzentgelte für (dezentrale) KWK-Anlagen. Hierdurch könnte ein Anreiz für die Investition in größere Wärmespeicher und systemdienliche Betriebsweisen geschaffen werden. Insbesondere für kleine Anlagen in der Objekt- und Quartiersversorgung, für welche eine Teilnahme an Systemdienstleistungsmärkten häufig mit zu hohem administrativen Aufwand verbunden ist.

5.3 Rahmenbedingungen zur Defossilisierung von KWK

Bis heute basiert die gesamte Strom- und Wärmeerzeugung noch zu einem großen Teil auf fossilen Energieträgern: Während Strom in Deutschland inzwischen zu immerhin fast 50 % aus erneuerbaren Quellen stammt,¹⁰⁹ beträgt der Anteil an erneuerbaren Energien in der Wärmeerzeugung bisher nur etwa 13 %.¹¹⁰ Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen erfolgt zu knapp 25 % durch Erneuerbare (Biomasse), zu 50 % durch Erdgas und zu etwa 20 % aus Kohle und Öl.¹¹¹

Bis zum Erreichen des deutschen Ziels von Klimaneutralität im Jahr 2045 wird auch die KWK-Erzeugung klimaneutral werden. Entsprechend werden KWK-Anlagen spätestens 2045 nur noch klimaneutrale Brennstoffe einsetzen. Also Energieträger, die bei der Verbrennung zur Strom- oder Wärmeerzeugung nicht mehr Emissionen freisetzen als sie kurz zuvor gebunden haben. Auf dem Weg dahin gilt es zudem, erhebliche Schritte zur Reduktion der CO₂-Emissionen zu unternehmen.

Die Umsetzung dieser Ziele erfordert entsprechende Rahmenbedingungen für Investoren und Betreiber. Im Rahmen der Erarbeitung der Studie wurden insbesondere die folgenden Bausteine identifiziert.

Anreize für Ersatz von Kohle-KWK durch Erdgas

Ein sehr wichtiger Baustein zur Reduktion der CO₂-Emissionen von KWK besteht darin, schnellstmöglich kohlebefeuerte KWK in der öffentlichen Versorgung und der Industrie durch gasbasierte KWK zu ersetzen:

- **Anpassung von Kohleersatzbonus und KVBG** – Das KWKG enthält mit dem Kohleersatzbonus gemäß § 7c bereits einen diesbezüglichen Anreizmechanismus. Dieser sieht eine Zahlung in Euro je kW elektrischer KWK-Leistung vor, der die elektrische KWK-Leistung einer bestehenden mit Stein- oder

¹⁰⁸ Siehe hierzu z.B. dena (2022).

¹⁰⁹ Anteil von erneuerbaren Energien an der Netto-Stromerzeugung 2019: 45 % (2020 50 %, 2021 46 %). Siehe Fraunhofer ISE (2022).

¹¹⁰ Anteil von erneuerbaren Energien an der Wärmeerzeugung 2019: 5 % (2020 16 %). Siehe UBA (2021d).

¹¹¹ Siehe Kapitel 4.2.

Braunkohle betriebenen KWK-Anlage ersetzt. Auch das Kohleverstromungsbeendigungsgesetz (KVBG) enthält diesbezügliche Vorgaben und Anreize, wie z. B. Ausschreibungen zur Reduzierung der Steinkohleverstromung. Allerdings sind diese Instrumente bisher auf einen Kohleausstieg bis 2038 ausgelegt und entsprechend voraussichtlich von der Höhe her zu gering. Es bedarf also einer Anpassung auf den von der Bundesregierung angestrebten beschleunigten Kohleausstieg bis 2030.

- **Berücksichtigung von Gas-KWK in der EU Taxonomie** – Auch die Berücksichtigung von Gaskraftwerken in dem Vorschlag der EU-Kommission zur Taxonomieverordnung von Januar 2022 ist grundsätzlich geeignet, Anreize für den Ersatz von Braunkohle-KWK durch Gas-KWK zu erzeugen. Die Möglichkeit der Einschätzung von Investitionen in Gaskraftwerken als „nachhaltig“ eröffnet günstigere Finanzierungspotenziale und ist ein positives Signal für potenzielle Investoren. Die Knüpfung der Nachhaltigkeit an das Kriterium des Ersatzes eines emissionsintensiveren Energieträgers kann zudem helfen, den Ersatz von Kohle durch Gaskraftwerke zu ermöglichen. Die weiteren Kriterien für Gaskraftwerke und hocheffiziente KWK-Gaskraftwerke sind allerdings sehr eng gefasst, und nur bedingt erfüllbar. Hier bedarf es im weiteren Prozess der Abstimmung mit den Mitgliedsstaaten und dem Europäischen Parlament eine sorgfältige Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen der konkreten Kriterien für Ökonomie, Ökologie und Versorgungssicherheit.
- **Stärkung und Ausweitung des EU-ETS** – Ein hoher und möglichst stabiler CO₂-Preis ist ein wichtiges kommerzielles Signal für einen Brennstoffwechsel (Fuel Switch) von Kohle zu Gas. Der aktuell hohe CO₂-Preis im Rahmen des EU ETS kann daher auf absehbare Zeit einen Beitrag dazu leisten, den Fuel Switch voranzutreiben – im Ausmaß natürlich abhängig insbesondere vom Kohle-zu-Gas-Preisverhältnis. Wie bereits in Kapitel 5.1 erläutert wird es zukünftig wichtig sein, das EU ETS zu stärken und mögliche Verzerrungen aus dem Nebeneinander von EU ETS und nETS zu minimieren. Langfristig möglichst durch eine Integration der Sektoren Gebäude und Verkehr in das EU ETS. Allerdings ist hierbei immer die Bezahlbarkeit der Energie im Auge zu behalten. Entlastungen für vulnerable Verbraucher sollten allerdings möglichst außerhalb des Preismechanismus vorgenommen werden (z.B. über pauschale Entlastungen), um die gewünschten Verhaltensanreize (z.B. zur Energieverbrauchsreduktion) nicht zu verzerren.

Anreize für Ersatz von Erdgas durch emissionsarme Brennstoffe wie Biomethan und Wasserstoff

Während ein Fuel Switch von Kohle zu Erdgas in den nächsten Jahren bereits wichtige Beiträge zur CO₂-Reduktion der Strom- und Wärmeerzeugung leisten kann, bedarf es für weitergehende Klimaschutzanstrengungen des Einsatzes nicht-fossiler Brennstoffe wie zum Beispiel Biomethan und Wasserstoff in KWK-Anlagen. Siehe Kapitel 4.4 für mögliche Transformationspfade des Energieträgereinsatzes von KWK heute bis zur Klimaneutralität in 2045.

Um dies zu erreichen sind zeitnah wichtige Voraussetzungen zu schaffen:

- **Erhalt der Biomethan-Förderung im KWKG** – Wie in Kapitel 4.4 erläutert wird die KWK-Erzeugung im Zuge der Defossilisierung sukzessive auf Biomethan und Wasserstoff umgestellt werden. Ein Ausschluss von Biomethan in der KWK-Förderung, wie im Osterpaket der Bundesregierung ab 2023 vorgesehen,¹¹² schließt eine solche Umstellung faktisch aus. Damit KWK-Anlagen die in diesem Bericht dargelegten Stärken in ein zukünftig klimaneutrales Energiesystem vollumfänglich einbringen können, muss ein solcher Ausschluss der Biomethannutzung in KWK-Anlagen vermieden werden.
- **Anerkennung von Biomethan als erneuerbarer Energieträger in der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze** – Die Bundesregierung plant mit der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) ein neues Programm um den Umstieg auf erneuerbare Energien und die Nutzung industrieller Abwärme in Wärmenetzen zu fördern. Dabei wird es wichtig sein, ein Level-Playing-Field zwischen verschiedenen erneuerbaren Energieträgern zu schaffen und einen technologieoffenen Wettbewerb zuzulassen, z.B. auch durch Anerkennung von Biomethan als erneuerbaren Energieträger.
- **Sicherstellung emissionsarmer Brennstoffe** – Ein zunehmender Einsatz von Biomethan und Wasserstoff in KWK-Anlagen setzt darüber hinaus die Verfügbarkeit bezahlbarer Brennstoffe voraus. Hierzu bedarf es entsprechender Rahmenbedingungen, unter anderem:
 - **Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien** – Die Ausbauziele der Bundesregierung für Wind und Photovoltaik sind ambitioniert. Um diese zu erreichen, müssen die gesellschaftliche Akzeptanz verbessert, Genehmigungsverfahren beschleunigt und Barrieren wie Abstandsregeln abgebaut werden. Dies ermöglicht auch eine höhere Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom für die Erzeugung von grünem Wasserstoff zum Einsatz in KWK-Anlagen. Zudem müssen Bedingungen geschaffen werden, um weitere Biomasse-Potenziale realisieren zu können. Beispielsweise von landwirtschaftlichen oder industriellen Reststoffe wie z. B. Sägerestholz, Papierschlämme oder Nebenprodukten der Lebensmittelverarbeitung.
 - **Anschubfinanzierung für Wasserstoff und Biomethan** – Die großskalige Herstellung von Wasserstoff über Elektrolyse (aus Wasser unter Einsatz von Strom) oder Pyrolyse (aus Erdgas) ist noch in den Kinderschuhen. Die Kosten sind dementsprechend noch vergleichsweise hoch. Bei serieller Herstellung der Komponenten in industriellem Maßstab ist allerdings zukünftig von erheblichen Kostensenkungen auszugehen. Um diese zu realisieren bedarf es einer Anschubfinanzierung. Hierzu eignen sich grundsätzlich verschiedene Fördermechanismen, deren Vor- und Nachteile bezüglich Kriterien wie Effektivität, Effizienz und Verteilungswirkungen sorgfältig abgewogen werden müssen:
 - **Angebotsseitige Instrumente**, welche den nicht am Markt erzielbaren Teil der Mehrkosten der Produktion des emissionsarmen Brennstoffs (z. B. grünem Wasserstoff) gegenüber der fossilen Alternative (z. B. Erdgas oder grauem Wasserstoff) kompensieren. Hierzu zählen z. B. Investitionszuschüsse oder Einspeisezuschüsse (mit festem Zuschuss

¹¹² https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.html.

oder als Differenzvertrag [*Contract for Difference*]). Diese können auch die Brennstoffproduktion im Ausland und deren Import nach Deutschland bzw. die EU gezielt fördern. Dies ist z. B. im Rahmen des *H2 Global* Förderprogramms der Bundesregierung beabsichtigt, welches im Dezember die beihilferechtliche Genehmigung der EU Kommission erhalten hat.¹¹³

- **Nachfrageseitige Instrumente**, welche Verbrauchern bestimmte Auflagen zur Nutzung emissionsarmer Brennstoffe auferlegen oder deren Nutzung finanziell fördern. Hierzu zählen beispielsweise Quotenverpflichtungen, im Rahmen derer ein Grüngasziel (allgemein für grüne Gase oder konkret für Wasserstoff oder Biomethan) für bestimmte Jahre (X% für 2030; Y% für 2040, Z% für 2045) definiert wird. Marktakteure wie z.B. Gasversorger werden dann verpflichtet, diese Quoten für ihre Netze oder Kunden einzuhalten, wodurch eine Nachfrage nach grünen Gasen geschaffen wird. Zu nachfrageseitigen Förderinstrumenten gehören auch Klimaschutzdifferenzverträge (*Carbon Contracts for Difference*), welche z. B. einem Industrieproduzenten die Mehrkosten einer Industriegüterproduktion auf Basis von Wasserstoff gegenüber der herkömmlichen fossilen Methode entlohnen.
- **Definition für emissionsfreien bzw. klimaneutralen Wasserstoff:** Elementar für den Markthochlauf von Wasserstoff ist eine eindeutige und rechtssichere Definition von emissionsfreiem bzw. klimaneutralen Wasserstoff. Die entsprechenden delegierten Rechtsakte der Europäischen Kommission werden derzeit konsultiert. Es besteht daher bei potenziellen Investoren weiterhin Unklarheit z.B. darüber, welche Kriterien bezüglich der räumlichen Nähe und der zeitlichen Korrelation zwischen Wasserstoffproduktion und erneuerbarer Stromproduktion bestehen muss, damit dieser Wasserstoff als „grün“ eingestuft wird.
- **Zertifizierung des CO₂-Fußabdrucks** – Wesentlich für einen nachhaltigen Einsatz emissionsarmer Brennstoffe in der KWK ist auch ein funktionsfähiges und möglichst europaweites oder globales Zertifizierungssystem. Hierdurch kann der CO₂-Fußabdruck bei der Herstellung und dem Transport des jeweiligen Brennstoffs gemessen und nachgewiesen werden. Dies ermöglicht auch den Einsatz importierten Biomethans oder Wasserstoffs in KWK-Anlagen.

Sicherstellung der Wasserstoff-Readiness von KWK-Anlagen

Während Biomethan aufgrund der zuvor erfolgten Biogasaufbereitung über eine analoge chemische Zusammensetzung wie Erdgas verfügt und deshalb im Grundsatz technisch unbegrenzt in Gas-KWK-Anlagen verwendet werden kann, bedarf es für einen Einsatz von Wasserstoff technischer Anpassungen an den Anlagen.

Hier sollte die Politik zeitnah entsprechende Auflagen formulieren, dass zukünftige Neuanlagen schnellstmöglich „Wasserstoff-ready“ sein müssen. Wasserstoff-ready bedeutet, dass eine Anlage bereits heute die Norm G260 des Deutschen Verbandes des Gas- und Wasserfachs (DVGW) erfüllen muss, und die Anlage

¹¹³ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_7022.

später mit entsprechendem Nachrüsten auf 100 % Wasserstoff umgerüstet werden kann. Die hiermit verbundenen Kosten sind entsprechend auch in der KWK-Förderung angemessen zu berücksichtigen. Eine pauschale Festlegung, wie im Osterpaket des BMWK mit einer Festschreibung der Wasserstoff-Umrüstkosten auf 10 % der Anfangsinvestition vorgesehen,¹¹⁴ ist dabei nicht sachgerecht.

Auf der anderen Seite sind auch die Energieindustrie und KWK-Branche in der Pflicht: KWK-Hersteller sollten die technischen Voraussetzungen für eine hohe Wasserstoffkompatibilität proaktiv forcieren und entsprechende Konzepte entwickeln. KWK-Betreiber müssen auch für Bestandsanlagen Umrüstoptionen prüfen und diese mit KWK-Herstellern entwickeln und wenn möglich umsetzen. Eine entsprechende Entwicklung ist auch derzeit im Markt zu beobachten.

Sicherstellung von Wasserstoff-Infrastruktur

Neben der Brennstoff-Verfügbarkeit und der Kompatibilität der Anlagen bedarf es auch einer wasserstofffähigen Transport- und Verteilnetzinfrastuktur sowie nötiger Wasserstoffspeicher. Auch hier müssen zeitnah die Voraussetzungen für eine zunehmende Wasserstoffbeimischung sowie perspektivisch einen reinen Wasserstofftransport geschaffen werden. Dies betrifft gleichermaßen technische wie auch rechtliche, regulatorische und kommerzielle Aspekte.

Die Ferngasnetzbetreiber und Verteilnetzbetreiber treiben diesbezüglich umfassende Aktivitäten voran. Zahlreiche Netzbetreiber sind in Pilotprojekten zur zunehmenden Wasserstoffbeimischung in Gasnetze und/oder vollständigen Umwidmung von Erdgasnetzen zu Wasserstoff involviert. Der FNB Gas hat zudem auf Basis erwarteter Wasserstofferzeugung, Wasserstoffverbrauchsschwerpunkten und bestehender Erdgasleitungen mögliche Entwicklungen eines dezidierten Wasserstoffnetzes in Deutschland modelliert.¹¹⁵ Der DVGW erarbeitet die Möglichkeiten einer höheren Wasserstoffbeimischung im Netz, und entwickelt zudem gemeinsam mit der Initiative H2vorOrt und dem VKU derzeit einen Gastransformationsplan für die Versorgung mit klimaneutralen Gasen in den Verteilnetzen. Zudem haben europäische Fernleitungsnetzbetreiber unter der Bezeichnung „Hydrogen Backbone“ einen Netzentwicklungsplan für die Errichtung eines Wasserstoff-Fernleitungsnetzes vorgelegt, der kontinuierlich weiterentwickelt wird.

In diesem Kapitel wurde beleuchtet, welche Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, um eine erfolgreiche Transformation der KWK umzusetzen. Die Ausführungen sind dabei als Impulse für weitere Diskussionen und Analysen zu verstehen. Eine detaillierte politische Umsetzungsempfehlung würde den Rahmen des vorliegenden Berichtes übersteigen.

¹¹⁴ Siehe https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publication-File&v=8.

¹¹⁵ <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz/>.

DAS POTENZIAL DER KWK FÜR DIE TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALEN ENERGIEVERSORGUNG

LITERATURVERZEICHNIS

- **50Hertz (2018)**, Erbringung von Redispatch und SDL durch KWK-/EE-Anlagen https://stiftung-umweltenergierecht.de/wp-content/uploads/2018/11/Stiftung_Umweltenergierecht_20181127_Fokus_KWK_Systemdienstleistungen_EE_Henkel.pdf
- **AG Energiebilanzen e.V. (2020)**, Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland 2019.
- **AG Energiebilanzen e.V. (2021)**, Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2020.
- **BAFA (2021a)**, Vom BAFA nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz zugelassenen Wärme- und Kältespeicher. Datenstand vom 01.08.2021, https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/kwk_statistik_zulassungen_waerme_kaeltespeicher.pdf;jsessionid=97C009092C0C22CD276C4FB15D382813.2_cid378?blob=publicationFile&v=21.
- **BAFA (2021b)**, Zulassung von KWK-Anlagen nach dem KWK-Gesetz, Datenstand vom 31.12.2021, https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/kwk_statistik_zulassungen_kwk_anlagen.pdf?blob=publicationFile&v=20.
- **BCG (2021)**, Klimapfade 2.0, Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft, Studie für den BDI, <https://web-assets.bcg.com/58/57/2042392542079ff8c9ee2cb74278/klimapfade-study-german.pdf>.
- **BDEW (2019a)**, Gas kann grün: Die Potentiale von Biogas/Biomethan, https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20190426_Gas-kann-gruen-Potentiale-Biogas.pdf.
- **BDEW (2019b)**, Wie heizt Deutschland 2019?, BDEW-Studie zum Heizungsmarkt, https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20191031_Wie-heizt-Deutschland-2019.pdf.
- **BFE (2021)**, Energiespeichertechnologien Kurzüberblick 2021, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/forschung-und-cleantech/forschungsprogramme/batterien.html>.
- **B.KWG (2020)**, Neue Festlegungen für Vollbenutzungsstunden im KWKG: Zukünftige Auslegung von KWK als stromerzeugende Heizung in der Wohnungswirtschaft <https://www.bkww.de/auslegung-kwk/>.
- **BMWi (2019)**, Evaluierung der Kraft-Wärme-Kopplung – Analysen zur Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in einem Energiesystem mit hohem Anteil erneuerbarer Energien <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/evaluierung-der-kraft-waerme-kopplung.html>.
- **BMWi (2020)**, Die Nationale Wasserstoffstrategie, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?blob=publicationFile>.

- **BMWi (2021a)**, Zahlen und Fakten Energiedaten, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiesdaten-gesamtausgabe.html>.
- **BMWi (2021b)**, Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3, <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>.
- **BMWi (2021c)**, Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland, Stand: September 2021 https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html.
- **BMWK (2021)**, Bundesförderung für effiziente Gebäude - Novellierung tritt in Kraft, <https://www.deutschland-machts-effizient.de/KAENEF/Redaktion/DE/Meldungen/2021/2021-10-21-bundesfoerderung-fuer-effiziente-gebaeude-novellierung-tritt-in-kraft.html>.
- **BMWK (2022a)**, Eröffnungsbilanz Klimaschutz, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=22.
- **BMWK (2022b)**, Überblickspapier Osterpaket, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf/?__blob=publicationFile&v=12.
- **Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2020)**, Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung vom 8. August 2020, <https://www.gesetze-im-internet.de/kvbq/BJNR181810020.html>.
- **Bundesnetzagentur (2021a)**, Kraftwerksliste Bundesnetzagentur, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html, Stand 19.01.2021.
- **Bundesnetzagentur (2021b)**, Monitoringreferat, Kraftwerke am Strommarkt, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html, Stand 19.01.2021.
- **Bundesnetzagentur (2021c)**, Kraftwerksliste Bundesnetzagentur zum erwarteten Zu- und Rückbau 2021 bis 2024, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/Veroeff_ZuUndRueckbau_2021_1.xlsx?__blob=publicationFile&v=4, Stand 15.11.2021.
- **Bundesnetzagentur (2021d)**, Bericht zum Zustand und Ausbau der Verteilernetze 2020, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/ZustandAusbauVerteilernetze2020.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- **Bundesregierung (2019)**, Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>.

- **Bundesregierung (2021)**, Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist, <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>.
- **dena (2017)**, biogaspartner – gemeinsam einspeisen, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9154_Broschuere_biogaspartner_-_gemeinsam_einspeisen.2017_de.pdf.
- **dena (2018)**, Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.), dena-Leitstudie Integrierte Energiewende, [9261 dena-Leitstudie Integrierte Energiewende lang.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf).
- **dena (2021a)**, Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.), dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, „dena-Leitstudie 2“, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf.
- **dena (2021b)**, Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.), dena-Studie, Das Quartier – Teil 1, Überblick über die gesetzlichen Rahmenbedingungen und Förderrichtlinien für die Energieversorgung von Gebäuden im räumlichen Zusammenhang, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/dena-STUDIE_Das_Quartier.pdf.
- **dena (2022)**, Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.), dena-STUDIE: Das Quartier – Teil 2, Analyse des Zusammenspiels und Aufzeigen von Schwachstellen, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/dena-STUDIE_Das_Quartier_-_Teil_2.pdf.
- **DLR (2021)**, Endenergieverbrauch für Wärme nach Temperatur- und Industriebereichen, https://www.dlr.de/content/de/bilder/2016/1/endenergieverbrauch-fuer-waerme-nach-temperatur-und-industriebereichen_22270.html.
- **Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (2022)**, Leitfaden für stationäre Anlagen im Europäischen Emissionshandel: Zusammenwirken Europäischer Emissionshandel und nationaler Brennstoffemissionshandel, Vorabzug von Brennstoffmengen nach § 7 Absatz 5 BEHG und nachträgliche Kompensation nach § 11 Absatz 2 BEHG https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/stationaere_anlagen/2021-2030/Leitfaden-euets-nehs.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- **DVGW (2020)**, H2 vor Ort – Making Hydrogen usable for everyone via the gas distribution networks, <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2vorort-wasserstoff-gasverteilnetz-dvgw-broschuere-engl.pdf>.
- **DVGW (2021)**, Zwei-Energieträger-Welt, <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/zwei-energietraeger-welt-strom-waerme-mobilitaet-factsheet-dvgw.pdf>.
- **DVGW (2022)**, Verfügbarkeit und Kostenvergleich von Wasserstoff – Merit Order für klimafreundliche Gase in 2030 und 2045, <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202116-1-dvgw-verfuegbarkeit-kostenvergleich-h2.pdf>.
- **EEG (2021)**, Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien.

- **Enervis (2017)**, Erneuerbare Gase: Ein Systemupdate der Energiewende, im Auftrag von Initiative Erdgasspeicher e.V. (INES) und Bundesverband Windenergie e.V. (BWE), Dezember 2017, https://erdgasspeicher.de/wp-content/uploads/2019/07/20171212_studie_erneuerbare_gase_enervis.pdf.
- **Europäische Kommission (2022a)**, ANNEX I amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139, https://ec.europa.eu/finance/docs/level-2-measures/taxonomy-regulation-delegated-act-2022-631-annex-1_en.pdf.
- **Europäische Kommission (2022b)**, REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy, COM(2022) 108 final, 8. März 2022, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:71767319-9f0a-11ec-83e1-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.
- **EWI (2021a)**, Auswirkungen des Koalitionsvertrags auf den Stromsektor 2030, Analyse des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln, https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2021/12/211206_EWI-Analyse_Auswirkungen-des-Koalitionsvertrags-auf-den-Stromsektor-2030_final.pdf
- **EWI (2021b)**, dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Datenanhang Ergebnisse. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena), <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/dena-ls2/>.
- **FfE (2020)**, DemandRegio, Harmonisierung und Entwicklung von Verfahren zur regionalen und zeitlichen Auflösung von Energienachfragen, <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/demandregio-harmonisierung-und-entwicklung-von-verfahren-zur-regionalen-und-zeitlichen-aufloesung-von-energienachfragen/>.
- **Fraunhofer ISE (2019)**, Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf.
- **Fraunhofer ISE (2020a)**, Wärmepumpen in Bestandsgebäuden. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „WPsmart im Bestand“, Abschlussbericht, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, https://wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/wp-smart-im-bestand/download/Berichte/BMWi-03ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf
- **Fraunhofer ISE (2020b)**, Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland 2019 <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2019/oeffentliche-nettostromerzeugung-in-deutschland-2019.html>
- **Fraunhofer ISE (2022)**, Energy-Charts, Jährlicher Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland https://energy-charts.info/charts/renewable_share/chart.htm?l=en&c=DE&interval=year
- **Fraunhofer ISI et al (2021)**, Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Studie für BMWi, Szenario Explorer Energieangebot <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/szenario-explorer/angebot.php>

- **Frontier Economics et al. (2017)**, Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland, Eine modellbasierte Analyse, Frontier Economics, IAEW, FourManagement, EMCEL, September 2017, <https://www.frontier-economics.com/media/2260/der-wert-der-gasinfrastruktur.pdf>.
- **Frontier Economics und IAEW (2019)**, The Value of Gas Infrastructure in a Climate-neutral Europe, Studie für die Green Gas Initiative, <https://www.frontier-economics.com/media/3120/value-of-gas-infrastructure-report.pdf>.
- **Frontier Economics (2021a)**, Die Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt, Kurzstudie für Viessmann Climate Solutions, <https://www.frontier-economics.com/media/4590/wasserstoff-im-waermemarkt.pdf>.
- **Frontier Economics (2021b)**, Der Wert von Wasserstoff im Wärmemarkt, Analyse unter Betrachtung verschiedener Heiztechnologien mit Fokus auf Wasserstoffbrennwertkessel und elektrische Wärmepumpe, Studie für FNB Gas, <https://www.frontier-economics.com/media/4828/der-wert-von-wasserstoff-im-waermemarkt.pdf>.
- **Gas Infrastructure Europe (2021)**, GIE Storage Map, https://www.gie.eu/wp-content/uploads/filr/3997/GIE_STOR_2021_A0_1189x841_FULL_TOPO_B_110_final.pdf.
- **Geth et al. (2015)**, An overview of large-scale stationary electricity storage plants in Europe: Current status and new developments, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115007923>.
- **Guidehouse (2020)**, Gas Decarbonisation Pathways 2020–2050, <https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2020/04/Gas-for-Climate-Gas-Decarbonisation-Pathways-2020-2050.pdf>.
- **Guidehouse (2022)**, European Hydrogen Backbone, A European Hydrogen Infrastructure Vision Covering 28 Countries, <https://www.ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>.
- **Hochschule Trier (2021)**, PV-Erträge lagen 2020 um 41% höher als im langjährigen Durchschnitt, <https://www.pv-magazine.de/2021/02/11/photovoltaik-ertraege-lagen-2020-um-41-prozent-hoeher-als-im-langjaehrigen-durchschnitt/>.
- **Hönig, C. (2011)**, Trinkwassererwärmung mit Wärmepumpen, TGA-Fachplaner, 02/2011, S. 26-31.
- **Hydrogen4EU (2021)**, Charting pathways to enable net zero, https://www.hydrogen4eu.com/files/ugd/2c85cf_69f4b1bd94c5439f9b1f87b55af46afd.pdf.
- **INES (2022)**, Gasspeicherkapazitäten, <https://erdgasspeicher.de/erdgasspeicher/gasspeicherkapazitaeten/>.
- **International Energy Agency (IEA) (2019)**, The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities, Report prepared by the IEA for the G20, Japan, https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf#page=53&zoom=100,102,280.
- **International Energy Agency (IEA) (2020)**, Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth, World Energy Outlook special report,

- <https://www.roedl.de/themen/kursbuch-stadtwerke/2021/maerz/co2-bepreisung-behg-kraft-waerme-kopplung>.
- **SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP (2021)**, Mehr Fortschritt wagen Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, Koalitionsvertrag, https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf.
 - **Statista (2021)**, Bestand zentraler Wärmeerzeuger für Heizungen in Deutschland nach Kategorie im Jahr 2020, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/165282/umfrage/gesamtbestand-der-zentralen-waermeerzeuger-in-deutschland/>.
 - **SWM Infrastruktur (2016)**, Historische Temperaturtabellen <https://www.swm-infrastruktur.de/content/temperaturtabellen/TempHis.htm>.
 - **UBA (2020a)**, Status quo der Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland.
 - **UBA (2020b)**, Heizen mit Holz, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_heizen_mit_holz_bf.pdf.
 - **UBA (2021a)**, Trendtabellen THG nach Sektoren, Vorjahreschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2021_03_10_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx.
 - **UBA (2021b)**, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2019, Arbeitsstand 08/12/2021 <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>.
 - **UBA (2021c)**, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/kraft-waerme-kopplung-kwk>.
 - **UBA (2021d)**, Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#warmeerzeugung-aus-erneuerbaren-energien>.
 - **UBA (2021e)**, Wärmepumpe <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/waermepumpe#gewusst-wie>.
 - **UBA (2021f)**, Die Treibhausgase <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>
 - **Übertragungsnetzbetreiber (2021)**, Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021, 2. Entwurf, https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP_2035_V2021_2_Entwurf_Zahlen-Daten-Fakten_0.pdf.

ANHANG A STECKBRIEFE DER WÄRME- VERSORGUNGS-LÖSUNGEN

In Kapitel 2 fassen wir die Bewertung der betrachteten Wärmeversorgungs-lösungen für den Gebäudesektor (welche sich weitgehend auf Niedertemperatur-Prozesswärme übertragen lassen) zusammen.

In diesem Anhang stellen wir die zugrunde liegenden Steckbriefe zusammen, die auf einer qualitativen Bewertung der betrachteten Wärmeversorgungs-lösungen anhand der in Kapitel 2 beschriebenen Kriterien basiert. Bei den Steckbriefen handelt es sich um eine vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Wärmeversorgungs-lösungen für die Transformation zur Klimaneutralität. Alle dargestellten Technologien sind entsprechend gleichermaßen unter der Maßgabe eines Betriebs mit klimaneutralen Energieträgern bewertet. Bei dieser steckbriefartigen Darstellung handelt es sich naturgemäß um eine vereinfachende Bewertung, im Rahmen derer nicht alle Facetten der betrachteten Wärmeversorgungs-lösungen differenziert betrachten werden können.

Gebäude

Abbildung 36 Stilisierter Steckbrief: Zentrale KWK mit Fernwärme (klimaneutraler Brennstoff)

Grundsätzliche Funktionsweise	▶	<ul style="list-style-type: none"> Zentrale KWK-Anlage erzeugt Wärme und Strom zusammen unter Nutzung der Abwärme Heißer Wasserdampf oder Wasser wird über Rohrleitungen über moderate Entfernungen bzw. über separate Leitungen mit niedrigerer Temperatur zurücktransportiert 	
Anwendungsmöglichkeiten	▶	<ul style="list-style-type: none"> In Gebieten mit hoher Wärmedichte (urbaner Raum) 	
Wirkungsgrad	▶	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hoher Gesamtwirkungsgrad (85-95 %), ggf. Umwandlungsverluste bei Brennstoff 	
Steuerbarkeit	▶	<ul style="list-style-type: none"> Flexible Steuerbarkeit technisch gegeben und je nach Abnahmestruktur ggf. hohe Flexibilität in Wärme- und Stromangebot Temperatur kann ggf. in, eher engen, Toleranzbändern variiert werden 	
Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)	▶	<ul style="list-style-type: none"> Umrüstung auf dekarbonisierte Brennstoffe möglich bei gleichzeitiger Entlastung der Stromnetze Bei gasförmigen Brennstoffen ist Versorgungssicherheit durch Gasinfrastruktur (Leitungen, Speicher) weiterhin nutzbar; Bedarf dekarbonisierter Gase vsl. zu großem Anteil mit Importen gedeckt Moderate Flexibilität für KWK durch „Pufferleistung“ der Wärmenetze, die durch Integration zusätzlicher Wärmespeicher weiter erhöht werden kann 	
Auswirkungen auf Stromsystem	▶	<ul style="list-style-type: none"> Flexible Erzeugungstechnologie: Residuallastdeckung möglich Zunehmende Verknüpfung zwischen Strom- und Wärmesektor durch Wärmepumpen – KWK-Anlagen können bei kalten Außentemperaturen somit Stromsystem stützen 	
Kosten und Nutzen für Anwender	▶	<ul style="list-style-type: none"> Nur geringe Investitionen im eigenen Haus notwendig (kein Kessel, Brenner o.ä.): Keine lokalen Wärmeerzeuger innerhalb des Objekts notwendig (wenig Platz und Geräusche) Fernwärmetarife können je nach Anbieter vereinzelt relativ hoch sein; Bei gleichzeitig nicht-liberalisierten Endkundenmarkt ist kein Anbieterwechsel möglich, ggf. sogar Anschlusspflicht <ul style="list-style-type: none"> Weiterentwicklung der Fernwärmeanschlussbedingungen zur Kompatibilität mit Transformationsprozess und modernem Verbraucherschutzrecht erforderlich 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 37 **Stilisierte Steckbrief: Dezentrales BHKW (klimaneutraler Brennstoff)**

<p>Grundsätzliche Funktionsweise</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dezentrale KWK in der Industrie oder in der Objekt- und Quartiersversorgung ▪ Wirkungsweise ähnlich wie bei zentraler KWK, aber geringerer Leistungs- und Temperaturbereich 	
<p>Anwendungsmöglichkeiten</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Größere Wohnanlagen/Quartiere, öffentliche Gebäude (Schulen, Schwimmbäder etc.), auch Industrie 	
<p>Wirkungsgrad</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr hoher Gesamtwirkungsgrad; ggf. Umwandlungsverluste bei Brennstoff 	
<p>Steuerbarkeit</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Je nach Abnahmestruktur ggf. hohe Steuerbarkeit in Wärme- und Stromangebot 	
<p>Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei gasförmigen Brennstoffen ist Versorgungssicherheit durch Gasinfrastruktur (Leitungen, Speicher) weiterhin nutzbar; Bedarf dekarbonisierter Gase vsl. zu großem Anteil mit Importen gedeckt ▪ Schneller Biomethan-/Wasserstoff-Hochlauf erforderlich ▪ Keine Transportverluste durch dezentrale Verwendung 	
<p>Auswirkungen auf Stromsystem</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zunehmende Verknüpfung zwischen Strom- und Wärmesektor ▪ Erhöhung Flexibilität, wenn Stromausbeute der KWK-Anlage flexibel geändert werden 	
<p>Kosten und Nutzen für Anwender</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirtschaftlichkeit muss für jeden Einzelfall geprüft werden 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 38 **Stilisierte Steckbrief: Elektrische Wärmepumpe (Fokus auf Luft-Wasser-Wärmepumpe, Strom aus erneuerbaren Energien)**

Grundsätzliche Funktionsweise	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ventilator saugt Umgebungsluft an und überträgt sie auf Luft-Wärmetauscher (Verdampfer) ▪ Kältemittel verdampft und wird komprimiert (Verdichter), Druck und Temperatur steigen, Wärme wird mittels Wärmetauscher an das Heizsystem weitergeleitet 	
Anwendungsmöglichkeiten	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Potenzial für WP vor allem in gut gedämmten Gebäuden: Neubauten, sanierter Bestand; Kaum geeignet für unsanierter Bestand, sodass keine Lösung für schnelle Emissionsreduktion 	
Wirkungsgrad	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Jahresarbeitszahl (Verhältnis von Nutzwärme zu eingesetzter Energie), meist 2,5 bis 3,5 ▪ Wirkungsgrade abhängig von Außentemperatur und benötigter Vorlauftemperatur (geringere Wirkungsgrade bei kalten Außentemperaturen und höherer Vorlauftemperatur) 	
Steuerbarkeit	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Unterbrechbarkeit für mehrere Stunden am Tag durch Netzbetreiber möglich ▪ Für die Steuerbarkeit fallen zusätzliche Kosten durch gesonderten Zähler an 	
Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Im Gebäude in der Regel keine zusätzliche Infrastruktur zum Stromnetzanschluss benötigt (ggf. Verstärkung bestehender Leitungen); Gesamtsystem muss hingegen stark ausgebaut werden ▪ Hoher Fachkräftebedarf für Sanierung des Bestands zur Umrüstung auf Wärmepumpen ▪ Wärmeversorgung abhängig von Elektrizitätsversorgungssicherheit ▪ Versorgungssicherheit durch Gasinfrastruktur (Leitungen, Speicher) nicht mehr genutzt 	
Auswirkungen auf Stromsystem	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elektrifizierung der Wärmeversorgung beansprucht Stromnetze und bringt Saisonalität der Wärmenachfrage in den Stromsektor und verursacht weiteren Netzausbaubedarf 	
Kosten und Nutzen für Anwender	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmepumpen deutlich teurer als Gas- oder Ölheizungen; Ggf. umfangreiche Umrüstung Heizsystem notwendig (Pufferspeicher, Fußbodenheizung) sowie ggf. Wärmesanieung ▪ Strompreis historisch relativ teuer im Vergleich zu Gas, aktuelle Preisentwicklungen und Abschaffung EEG-Umlage verbessern Preisrelation zugunsten von Strom ▪ Gesamtkosten abhängig vom Verbrauch, der je nach WP-Typ und Hausgegebenheiten unterschiedlich ausfallen kann: Wenn Gebäude geeignet, relativ niedriger Verbrauch möglich ▪ In der Regel mit Fußbodenheizung und Raumbelüftung (hohe Behaglichkeit und Luftqualität) 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 39 Stilisierter Steckbrief: Hybrid-Wärmepumpe

<p>Grundsätzliche Funktionsweise</p>		<ul style="list-style-type: none"> Wärmepumpe in Kombination mit anderem Heizsystem, zukünftig v.a. mit H₂-ready-fähigen Gasbrennwertkessel Bei sehr kalten Temperaturen muss Wärmepumpe den strombetriebenen Verdichter oder Heizstab zuschalten (bei Hybridsystem übernimmt dies der Gaskessel) 	
<p>Anwendungsmöglichkeiten</p>		<ul style="list-style-type: none"> Hybridsysteme grundsätzlich in allen Gebäuden einsetzbar Gut geeignet im Gebäudebestand 	
<p>Wirkungsgrad</p>		<ul style="list-style-type: none"> Ähnlich Luft-Wasser-Wärmepumpe Durch Gaskessel lassen sich Phasen mit ineffizienter Stromzusatzbeheizung vermeiden 	
<p>Steuerbarkeit</p>		<ul style="list-style-type: none"> Unterbrechbarkeit Wärmepumpe für mehrere Stunden am Tag durch Netzbetreiber möglich (Für die Steuerbarkeit fallen zusätzliche Kosten durch gesonderten Zähler an) Gasseitig in Praxis nicht üblich, aufgrund Netzatmung auch nicht notwendig 	
<p>Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)</p>		<ul style="list-style-type: none"> Im Gebäude i.d.R. keine zusätzliche Infrastruktur zu Stromnetzanschluss benötigt, Gasanschluss notwendig Stromsystem muss ggf. ausgebaut werden (Übertragungs-, Verteilungsleitungen, Speicher) Hoher Fachkräftebedarf für Sanierung des Bestands zur Umrüstung auf Wärmepumpen Wärmeversorgung (teilweise) abhängig von Elektrizitäts-Versorgungssicherheit Versorgungssicherheit durch Gasinfrastruktur (Leitungen, Speicher) wird (teilweise) genutzt 	
<p>Auswirkungen auf Stromsystem</p>		<ul style="list-style-type: none"> Elektrifizierung der Wärmeversorgung beansprucht Stromnetze und bringt Saisonalität der Wärmenachfrage in den Stromsektor, sodass weiterer Ausbaubedarf entsteht – Effekt aber abgemildert durch Gaskessel 	
<p>Kosten und Nutzen für Anwender</p>		<ul style="list-style-type: none"> Hybrid-Wärmepumpen liegen zwischen Gaskessel und „Stand-alone-Wärmepumpe“ (Investition) Ggf. umfangreiche Umrüstung des Heizsystems notwendig (Pufferspeicher, Fußbodenheizung) sowie ggf. Wärmesanierung Gaszusatzheizung kann teuren Strombezug in sehr kalten Phasen deutlich reduzieren Wenn Gebäude geeignet, relativ geringer Verbrauch möglich Preisstellung Strom-/Erdgastarife ggf. ungünstig (zweifach Grundgebühr/Leistungspreis) 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 40 Stilisierter Steckbrief: Großwärmepumpe mit Fernwärmeversorgung

<p>Grundsätzliche Funktionsweise</p>		<ul style="list-style-type: none"> Funktionsweise grundsätzlich wie bei kleinen Wärmepumpen; Höherer Leistungs- und Temperaturbereich möglich (ca. 24 MW; bis ca. 150°C) Wärme für die Pumpe wird häufig aus Fluss-, Kühl- oder Abwasser entnommen 	
<p>Anwendungsmöglichkeiten</p>		<ul style="list-style-type: none"> Grundsätzlich geeignet in fernwärmeversorgten Gebäuden Nicht geeignet für ganz hohe Temperaturbereiche (derzeit max. 120° bis 150°C) Derzeit keine Standardlösungen, sondern noch Spezialanfertigungen 	
<p>Wirkungsgrad</p>		<ul style="list-style-type: none"> Prinzipiell vergleichbar gewöhnliche Wärmepumpen 	
<p>Steuerbarkeit</p>		<ul style="list-style-type: none"> Auslegung auf Grundlast oder mit höherer Steuerbarkeit in Technologiekombination bspw. mit KWK 	
<p>Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)</p>		<ul style="list-style-type: none"> Wärmeversorgung abhängig von Elektrizitätsversorgungssicherheit Weitere Option zur Defossilisierung der Wärmenetze: Kann perspektivisch Weiterbetrieb von Fernwärmenetzen sicherstellen, wenn KWK mit fossilen Brennstoffen nicht mehr weiterbetrieben werden kann Versorgungssicherheit durch Gasinfrastruktur (Leitungen, Speicher) nicht mehr genutzt 	
<p>Auswirkungen auf Stromsystem</p>		<ul style="list-style-type: none"> Elektrifizierung der Wärmeversorgung beansprucht Stromnetze und bringt Saisonalität der Wärmenachfrage in den Stromsektor 	
<p>Kosten und Nutzen für Anwender</p>		<ul style="list-style-type: none"> Aktuell noch sehr hohe Investitionskosten, wahrscheinlich mit zunehmender Standardisierung sinkend Wirtschaftlichkeit muss für jeden Einzelfall geprüft werden Bei Verwendung von Klär- oder Kühlwasser wird weniger Wärme in die Flüsse abgegeben (keine Einschränkungen in heißen Sommermonaten wie bei reinem Kühlwasser) 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 41 **Stilisierte Steckbrief: Gasbrennwertkessel (klimaneutraler Brennstoff)**

<p>Grundsätzliche Funktionsweise</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Heizwasser wird im ersten Wärmetauscher über Verbrennungswärme erhitzt; Kondensationswärme der Abgase vom Verbrennen von Gas wird genutzt zum zusätzlichen Erwärmen des Kesselwassers im zweiten Wärmetauscher ▪ Ab 2025 werden alle Heizgeräte vrsl. standardmäßig mit H₂-ready-Kessel angeboten 	
<p>Anwendungsmöglichkeiten</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grundsätzlich hohes Potenzial, da einsetzbar in den meisten Gebäudetypen, auch (unsaniertem) Bestand ▪ Praktisch v.a. im Neubau mit stark abnehmender Relevanz 	
<p>Wirkungsgrad</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr hohe Vollast-Wirkungsgrade und vor allem auch hohe Jahresnutzungsgrade ▪ Ggf. Umwandlungsverluste bei Brennstoffbereitstellung 	
<p>Steuerbarkeit</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ In Praxis nicht üblich, aufgrund Netzatmung auch nicht notwendig 	
<p>Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beitrag zur Diversifizierung des Wärmeangebots, dadurch höhere technische und ökonomische Stabilität ▪ Versorgungssicherheit durch weiterhin nutzbare Erdgasinfrastruktur (Leitungen, Speicher) 	
<p>Auswirkungen auf Stromsystem</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine direkten Auswirkungen ▪ Ggf. Preiseffekt über Merit-Order (höhere Nachfrage im Winter, ggf. höhere Strompreise) 	
<p>Kosten und Nutzen für Anwender</p>		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Niedrige Investitionskosten, aber aktuell und auch perspektivisch steigende Brennstoffkosten ▪ Sehr hohes Angebot an Anlagen und Installateuren; Geringe Anforderungen bei Wechsel von Öl- oder Heizwertkessel auf Brennwertkessel ▪ Leitungsgebundene Versorgung vorteilhaft, jedoch in vielen Neubauvierteln nicht mehr geplant ▪ Gasheizung aktuell mit negativem Image; kann Verkaufswert der Immobilie senken 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 42 **Stilisierte Steckbrief: Brennstoffzelle (klimaneutrales SNG, Biomethan oder Wasserstoff)**

<p>Grundsätzliche Funktionsweise</p>		<ul style="list-style-type: none"> Mittels chemischer Reaktion wird zugeführter Brennstoff (z.B. Wasserstoff, Biomethan, synthetisches Methan) in Strom und Wärme umgewandelt Sogenannte „kalte Verbrennung“ nahezu ohne Emissionen 	
<p>Anwendungsmöglichkeiten</p>		<ul style="list-style-type: none"> Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Industrie (tlw. sehr hohe Temperaturbereiche möglich) 	
<p>Wirkungsgrad</p>		<ul style="list-style-type: none"> Sehr hohe Wirkungsgrade, fast vollständige Nutzung des Energieinputs Hoher Stromanteil des Energieoutputs 	
<p>Steuerbarkeit</p>		<ul style="list-style-type: none"> Wärmeproduktion eher Grundlast und in Summe ggf. nicht ausreichend Zusätzlich Gaskessel o.ä. benötigt (tlw. bereits integriert in Brennstoffzelle) 	
<p>Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)</p>		<ul style="list-style-type: none"> Wasserstoff benötigt Leistungen, die ggf. neu errichtet werden müssen (tlw. Nutzung bestehender Erdgasinfrastruktur möglich) Ggf. übergangsweise eher Brennstoffzellen mit synthetischem Methan oder Biomethan eingesetzt (mit entsprechend vorhandener Infrastruktur) 	
<p>Auswirkungen auf Stromsystem</p>		<ul style="list-style-type: none"> Entlastung Stromnetz durch dezentrale Stromerzeugung 	
<p>Kosten und Nutzen für Anwender</p>		<ul style="list-style-type: none"> Sehr hohe Investitionskosten Neue Technologie im Heizbereich: Nur wenig Geräte am Markt verfügbar; nur wenig Installateure und Wartungsbetriebe 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 43 Stilisierter Steckbrief: Ölbrennwerttherme (klimaneutrales Heizöl)

Grundsätzliche Funktionsweise	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Heizwasser wird im ersten Wärmetauscher über Verbrennungswärme erhitzt ▪ Kondensationswärme der Abgase vom Verbrennen von Gas wird genutzt zum zusätzlichen Erwärmen des Kesselwassers im zweiten Wärmetauscher 	
Anwendungsmöglichkeiten	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorrangig im Bestand bei Ersatz alter Ölkessel in Kombination mit regenerativer Wärme ▪ Politisch vermutlich keine Akzeptanz für größere zukünftige Nutzung, v.a. im Neubau 	
Wirkungsgrad	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr hohe Wirkungsgrade (bis zu 99%) und vor allem auch hohe Jahresnutzungsgrade 	
Steuerbarkeit	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kein Netzsystem, keine zentrale Steuerbarkeit ▪ Anlage durch Kunden flexibel einsetzbar 	
Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zentral und dezentral sehr einfach und kostengünstig lagerbarer Brennstoff ▪ Keine Netzbelastung durch zusätzliche Nutzer oder Nachfragespitzen ▪ Dezentrale Versorgung durch breite Angebotsstruktur (Heizölhändler) ▪ Klimaneutrale Brennstoffe müssen vsl. überwiegend importiert werden, aber Anbieterstruktur wahrscheinlich deutlich breiter als bei fossilem Öl 	
Auswirkungen auf Stromsystem	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine 	
Kosten und Nutzen für Anwender	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Für MFH und EFH relativ günstige Lösung, sehr hohes Angebot an Anlagen und Installateuren ▪ Moderate Anschaffungskosten, aber hohe Brennstoffkosten ▪ Geringe Anforderungen bei Wechsel von bestehenden Ölkessel auf Brennwerttherme ▪ Unabhängigkeit beim Einkauf von Netzbetreibern oder festen Anbieter (aber ggf. hohes Preisrisiko) ▪ Hoher Platzbedarf im Haus sowie tlw. Geruchsbelästigung 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 44 Stilisierter Steckbrief: Pellet- oder Hackschnitzelheizung

Grundsätzliche Funktionsweise	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbrennung von Holzprodukten in einer Hauszentralheizung 	
Anwendungsmöglichkeiten	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einsetzbar in Gebäuden aller Art (Neubau, Altbau, unterschiedliche Sanierungsstände) ▪ Potenzial vor allem in ländlichen Regionen und isolierte Immobilien 	
Wirkungsgrad	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoher Gesamtwirkungsgrad (typisch ca. 85 bis 95%) 	
Steuerbarkeit	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kein Netzsystem, keine zentrale Steuerbarkeit ▪ Anlage durch Kunden flexibel einsetzbar 	
Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zentral und dezentral sehr einfach und kostengünstig lagerbarer Brennstoff ▪ Keine Netzbelastung durch zusätzliche Nutzer oder Nachfragespitzen ▪ Dezentrale Versorgung durch i.d.R. kleinere Holzlieferanten ▪ Sehr hohes inländisches Angebot (Deutschland aktuell netto-Exporteur), aber Ausbau begrenzt 	
Auswirkungen auf Stromsystem	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine 	
Kosten und Nutzen für Anwender	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Moderate Anschaffungs- und Brennstoffkosten ▪ Unabhängigkeit beim Einkauf von Netzbetreibern oder festen Anbieter (aber ggf. hohes Preisrisiko) ▪ Gewisser Platzbedarf für Heizung und Lager ▪ Teilweise muss Holz von Hand durch Nutzer nachgefüllt werden ▪ Positives ökologisches Image (auch positiv für Immobilienwert) 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 45 **Stilisierte Steckbrief: Solarthermie**

Grundsätzliche Funktionsweise	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umwandlung von Sonneneinstrahlung in thermische Energie ▪ Ein Wärmeträger (bspw. Wasser- oder Ölgemisch mit Frostschutzmittel) durchläuft Anlage und erhitzt sich (üblicher Temperaturbereich ca. 60° (Haushalt) bis 110°C(Fernwärme)) 	
Anwendungsmöglichkeiten	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Solarthermie i.d.R. als dezentrale Lösung auf Hausdächern, aber auch als (ergänzende) Wärmequelle für Fern- und Nahwärmenetze ▪ In Ländern mit höherer Sonneneinstrahlung auch solarthermische Kraftwerke möglich 	
Wirkungsgrad	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relativ niedriger Wirkungsgrad bei üblichen Hausanlagen 	
Steuerbarkeit	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abhängig von Sonneneinstrahlung, keine zentrale oder dezentrale Steuerbarkeit ▪ Nicht spitzenlast- oder residuallastfähig 	
Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Als Hausanlage dezentral, das aber immer ein Backup-Wärmesystem benötigt (hohe Saisonalität) ▪ Als Fernwärme-System nicht alleinstehend geeignet, kann aber entsprechend gesamten Brennstoffbedarf reduzieren 	
Auswirkungen auf Stromsystem	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine 	
Kosten und Nutzen für Anwender	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investitionskosten in Relation zum Wärmeertrag sehr hoch ▪ Keine weiteren Brennstoffkosten ▪ Als Hausanlage keine Platzersparnis ggü. Gasheizung (Wasserspeicher benötigt), bei Fernwärme entfällt Zwischenspeicher ▪ Positives ökologisches Image (auch positiv für Immobilienwert) 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 46 Stilisierter Steckbrief: Geothermie

Grundsätzliche Funktionsweise	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung von Erdwärme durch Bohrungen ▪ Je tiefer die Bohrung, desto höher ist tendenziell die nutzbare Wärme (ca. +3°C pro 100 Meter, aber auch Anomalien möglich mit höheren Werten) 	
Anwendungsmöglichkeiten	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oberflächennahe Geothermie mit Erd-Wärmepumpen in Haushalten ▪ Tiefe Geothermie (>400m) für Fernwärme, tlw. auch Stromerzeugung möglich (i.d.R. als KWK) 	
Wirkungsgrad	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mit Wärmepumpe vergleichbar hoch wie andere Wärmepumpensysteme ▪ Tiefe Geothermie mit Stromerzeugung sehr niedrig (tlw. nur ca. 10%) 	
Steuerbarkeit	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmebereitstellung in Grundlast ▪ Oberflächennahe Geothermie benötigt ggf. zusätzlich weitere Wärmequelle 	
Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grundsätzlich positiv, da weitere nicht-fossile und einheimische Wärmequelle ▪ Geologische Voraussetzungen regional/lokal sehr unterschiedlich und nicht überall gegeben ▪ In manchen Regionen oberflächennahe Nutzung kaum möglich, bspw. durch Grundwasserspiegelabsenkungen durch Kohlebergbau 	
Auswirkungen auf Stromsystem	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringfügige Entlastung Stromnetz durch reduzierten Strombedarf der Wärmepumpe ▪ Stromangebot durch tiefe Geothermie in Deutschland sehr gering 	
Kosten und Nutzen für Anwender	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bohrung sehr teuer (abhängig von Bohrtiefe, ca. 5000 Euro/100m) ▪ Bei Fernwärmeversorgung identische Eigenschaften wie andere zentrale KWK 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 47 **Stilisierte Steckbrief: Industrielle/unvermeidliche Abwärme in der Fernwärmeversorgung**

<p>Grundsätzliche Funktionsweise</p>		<ul style="list-style-type: none"> Zahlreiche Industrieprozesse sind mit hohen Wärmeverlusten verbunden, die bei entsprechender technischer Umrüstung für Wärmeversorgung genutzt werden könnte 	
<p>Anwendungsmöglichkeiten</p>		<ul style="list-style-type: none"> Neben Eigenversorgung der Industrie auch Einspeisung in Fernwärmenetz möglich Teilweise auch Stromerzeugung möglich Kommunale Abwärme nur sehr begrenzt verwendbar (zu niedrige Temperaturen) 	
<p>Wirkungsgrad</p>		<ul style="list-style-type: none"> Je nach Industrieprozess und Wärmeabgabe individuell 	
<p>Steuerbarkeit</p>		<ul style="list-style-type: none"> Wärmeabgabe abhängig von Industrieprozess Kaum gezielte Steuerung, eher Grundlastabgabe 	
<p>Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)</p>		<ul style="list-style-type: none"> Weitere Wärmeoption, die das Gesamtsystem entlasten kann Anwendungsmöglichkeiten abhängig von Industriestandorten und –prozessen Eher unterstützende Einspeisung in bestehende Netze, Netzneubau/-erweiterung nur für Industrieabwärme in den meisten Fällen nicht sinnvoll Risiko, dass Abwärmequelle zeitlich nicht dauerhaft verfügbar ist 	
<p>Auswirkungen auf Stromsystem</p>		<ul style="list-style-type: none"> Keine 	
<p>Kosten und Nutzen für Anwender</p>		<ul style="list-style-type: none"> Für Haushalte Vor- und Nachteile analog zu anderen zentralen KWK-Fernwärme-Systemen Da nur Beimischung und keine gesonderte Bepreisung aus Kundensicht keine Auswirkungen Für Industrie hohe Umrüstkosten vs. sinkende Wärmebezugskosten bzw. Wärmeerlöse (individuelle Situation entscheidend für Kosten-Nutzen-Betrachtung) 	

Quelle: Frontier Economics

Industrie

Abbildung 48 Stilisierter Steckbrief für Industrieanwendung: KWK (dekarbonisierter Brennstoff)

Grundsätzliche Funktionsweise	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ KWK-Anlage (i.d.R. auf Firmengelände) erzeugt Wärme und Strom zusammen unter Nutzung der Abwärme 	
Anwendungsmöglichkeiten	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Potenzial vor allem für Hochtemperaturanwendungen 	
Wirkungsgrad	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr hoher Gesamtwirkungsgrad 	
Steuerbarkeit	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Steuerbarkeit technisch gegeben ▪ Grundsätzlich hohe Flexibilität in Wärme- und Stromangebot ▪ Temperatur kann ggf. in bestimmten Toleranzbändern variiert werden 	
Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entlastung der Stromnetze bzw. z.T. Vermeidung von Stromnetzausbau ▪ Bei gasförmigen Brennstoffen ist Versorgungssicherheit durch Gasinfrastruktur (Leitungen, Speicher) weiterhin nutzbar; Dekarbonisierter Gase vsl. zu großem Anteil Importe ▪ Moderate Flexibilität für KWK durch „Pufferleistung“ bei Wärmenetzen, die durch Integration zusätzlicher Wärmespeicher weiter erhöht werden kann 	
Auswirkungen auf Stromsystem	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zunehmende Verknüpfung zwischen Strom- und Wärmesektor ▪ Erhöhung der Flexibilität, wenn Stromausbeute der KWK-Anlage flexibel geändert bzw. Wärme gespeichert werden kann 	
Kosten und Nutzen für Anwender	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kostensituation bei energieintensiven Prozessen sehr individuell ▪ In Vergangenheit hat sich industrielle KWK häufig als kosteneffizient erwiesen, speziell für Hochtemperaturwärme (externer Hochtemperaturwärmebezug nicht immer realisierbar) 	

Quelle: Frontier Economics

Abbildung 49 Stilisierter Steckbrief für Industrieanwendung: Brennstoffzelle (klimaneutraler Wasserstoff)

Grundsätzliche Funktionsweise	▶	<ul style="list-style-type: none"> Mittels chemischer Reaktion wird zugeführter Brennstoff (Wasserstoff, Erdgas o.a.) in Strom und Wärme umgewandelt Sogen. „kalte Verbrennung“ nahezu ohne Emissionen 	
Anwendungsmöglichkeiten	▶	<ul style="list-style-type: none"> Im Industriebereich tlw. sehr hohe Temperaturbereiche möglich Derzeit nur Versuchsanlagen und keine Standardlösungen für Brennstoffzellen, die sowohl die für Industrieprozesse benötigte Leistung und Temperaturen bereitstellen können 	
Wirkungsgrad	▶	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hohe Wirkungsgrade, fast vollständige Nutzung des Energieinputs I.d.R. höherer Stromanteil als KWK-Anlagen 	
Steuerbarkeit	▶	<ul style="list-style-type: none"> Wärmeproduktion eher Grundlast und in Summe ggf. nicht ausreichend: Hoher Verschleiß der Zellen bei flexibler Fahrweise bzw. variierende Last Teilweise Gaskessel o.ä. kombiniert mit Brennstoffzelle 	
Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)	▶	<ul style="list-style-type: none"> Wasserstoff benötigt Leitungen, die ggf. neu errichtet werden müssen (tlw. Nutzung bestehender Erdgasinfrastruktur möglich) 	
Auswirkungen auf Stromsystem	▶	<ul style="list-style-type: none"> Entlastung Stromnetz durch dezentrale Stromerzeugung 	
Kosten und Nutzen für Anwender	▶	<ul style="list-style-type: none"> Sehr hohe Investitionskosten, jedoch starke Preisdegression erwartet Zwar neue Technologie im reinen Heizbereich, für Industrieprozesse technische Expertise und Beschaffungsstrukturen ggf. schon weiter verbreitet 	

Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Derzeit bestehen nur Versuchsanlagen und keine Standardlösungen für Brennstoffzellen, die sowohl die für die Industrieprozesse benötigte Leistung als auch die benötigten Temperaturen bereitstellen können.

Abbildung 50 Stilisierter Steckbrief für Industrieanwendung: Direktelektrische Wärme (Power-to-Heat)

Grundsätzliche Funktionsweise	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vielfältige Prozesse der direkten Umwandlung von Strom in Wärme ▪ Erwärmungsverfahren für Wärmeträger (Dampf, Wasser) über Elektro-/Elektrodenkessel oder direkte Prozesswärme (bspw. Lichtbogen oder Infrarot) 	
Anwendungsmöglichkeiten	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr vielfältige industrielle Anwendungsprozesse ▪ Temperaturen über 500°C realisierbar ▪ Leistungsbereich bis zu 100 bis 120 MW derzeit technisch möglich 	
Wirkungsgrad	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr hohe Wirkungsgrade, fast vollständige Nutzung des Energieinputs (ca. 99%) ▪ Aber: vollständiger Strominput (ggf. Wirkungsgradverlust auf Vorstufe) 	
Steuerbarkeit	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr hohe und flexible Steuerbarkeit 	
Systemauswirkung und Versorgungssicherheit (Wärme)	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmeversorgungssicherheit abhängig von Stromversorgungssicherheit ▪ Geringere Diversifizierung im (Industrie-)Wärmebereich ▪ Bestehende Erdgasinfrastruktur wird nicht mehr weiter genutzt 	
Auswirkungen auf Stromsystem	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Je nach Industrieprozess sehr hoher Strombedarf ▪ Sehr hoher Bedarf zusätzlicher Stromnetzkapazitäten und gesicherter Stromerzeugungsleistung ▪ Sehr hohe regionale/lokale Belastung des Stromnetzes möglich 	
Kosten und Nutzen für Anwender	▶	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investitionskosten individuell je nach Wärmeprozess, aber in meisten Fällen mutmaßlich teurer als bestehende Wärmequellen ▪ Strombezugskosten aktuell deutlich höher als Erdgas, Heizöl oder Kohle ▪ Unabhängig von Temperatur sind ggf. nicht alle Industrieprozesse durch direktelektrische Wärme realisierbar (bspw. Elektrolichtbogen bei Stahl nur für Recycling von Altstahl aber nicht für Erzeugung Neustahl geeignet) 	

Quelle: Frontier Economics

DAS POTENZIAL DER KWK FÜR DIE TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALEN ENERGIEVERSORGUNG

