



# Transformation der Wärmeversorgung

Ein nachhaltiger und kosteneffizienter Weg

Policy Paper

Jens Clausen

# Impressum

## **Autoren**

Jens Clausen (Borderstep Institut) | clausen@borderstep.de

## **Projektdurchführung**

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH

Clayallee 323

14169 Berlin

## **Zitiervorschlag**

Clausen, J. (2020). Transformation der *Wärmeversorgung. Ein nachhaltiger und kosteneffizienter Weg. Policy Paper*. Berlin: Borderstep Institut.

## **Titelbild**

Solarthermieranlage Dronninglund © Danish Energy Agency

## **Zuwendungsgeber:**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Innovations- und Technikanalyse (ITA)

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Wärmewende und politische Mehrheiten.....	1
2 Wärmepotenziale in Deutschland.....	4
2.1 Solarthermie .....	4
2.2 Solare Wärme über Photovoltaik.....	4
2.3 Dezentrale Wärmepumpen .....	5
2.4 Abwärme.....	6
2.5 Tiefe Geothermie.....	6
2.6 Power-to-Gas und Kraft-Wärme-Kopplung .....	6
2.7 Power-to-Heat .....	7
2.8 Bioenergie .....	8
2.9 Wärmepolitik muss die tatsächlichen Wärmepotenziale berücksichtigen .....	8
3 Ein Szenario der Wärmeversorgung .....	11
4 Politische Instrumente zur Förderung der Wärmewende.....	13
5 Eine kosteneffiziente Politikstrategie für die Wärmewende.....	17
6 Quellen.....	19

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nationale Wärmepotenziale in Relation zum Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser .....	9
Abbildung 2: Szenario zur Deckung eines Wärmebedarfs von 400 TWh für Heizung und Warmwasser in 2040 .....	12
Abbildung 3: Bisherige und bis 2025 erwartete Kostensenkungen des seriellen Sanierens .....	18

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einsatz wirtschafts-, innovations- und energiepolitischer Instrumente bezogen auf die technologischen Wärmepotenziale .....	14
Tabelle 2: Akteure der Transformation und Instrumente.....	15

# 1 Wärmewende und politische Mehrheiten

Nachhaltige Entwicklung erfordert einen veränderten Umgang mit natürlichen Ressourcen und stellt hohe Anforderungen an die Leistungs- und Transformationsfähigkeit von Volkswirtschaften. Aus dem ambitionierten klimapolitischen Ziel der Klimaneutralität 2050 ergibt sich die Notwendigkeit, umweltpolitische Erfordernisse in einer Art umzusetzen, für die eine politische Mehrheit gefunden werden kann. Drei wesentliche Zielkategorien sind hierfür zu verbinden:

- (1.) Die Erfüllung des Pariser Klimaschutzabkommen, d.h. eine Darstellung der Wärmeversorgung ohne die Nutzung von Erdgas, Heizöl und Kohle,
- (2.) die Begrenzung der Investitionskosten wie auch der laufenden Kosten der Wärmeversorgung auf das notwendige Minimum,
- (3.) die zuverlässige Versorgung mit Raumwärme.

Nun gibt es vielfach eine Neigung dazu, für Probleme grundsätzlich eine „große Einzellösung“ zu suchen, die das Problem ein für alle Mal löst. Das war z.B. für die Schadstoffproblematik der 1980er Jahre der Dreiwegekatalysator. Für die Feinstaubproblematik sind es Euro-Temp6-Motoren. Für die Wärmeversorgung ist eine solche „einfache“, auf wenige Einzelmaßnahmen fokussierte Lösung aufgrund der Komplexität des technischen und sozio-ökonomischen Systems der Wärmeversorgung nicht möglich. Die ökologisch wie auch kostenoptimale Lösung der Wärmeversorgung kann nur durch ein komplexes System unter Bündelung zahlreicher Einzelkomponenten und -maßnahmen erreicht werden. Dies soll einleitend an einem Beispiel deutlich gemacht werden:

So sieht die Dena-Leitstudie „Integrierte Energiewende“ die Zahl der Wärmepumpen zur Gebäudeheizung auf bis zu 17 Millionen Stück steigen (Dena, 2018, S. Teil 8, 19). Bei einem Bestand von ca. 19 Mio. Gebäuden (Statistisches Bundesamt, 2018, S. 16) mit Wohnraum, entspräche dies einem Ausstattungsgrad von ca. 90 % aller Wohngebäude. Auch das Umweltbundesamt erwartet von Wärmepumpen in 2050 einen Beitrag von bis zu 75 % der Raumwärme- und Warmwasserversorgung (Umweltbundesamt, 2019, S. 173). Da Wärmepumpen nur dann mit hoher Arbeitszahl und damit niedrigen Betriebskosten laufen, wenn das beheizte Gebäude einen hohen Energiestandard aufweist, ist die „einfache große Lösung“ der Wärmepumpe für (fast) alle Gebäude mit hohen Investitionskosten verbunden, für die bisher kein umfassendes Finanzierungskonzept vorgelegt wurde. Da die Kosten im Billionen-Euro-Bereich liegen werden, ist das kein triviales, Problem. Zudem würde die Beheizung eines Innenstadtviertels mit Blockrandbebauung nur mit Luft-Luft-Wärmepumpen möglich sein, die im Winter zu einer nicht unerheblichen Lärmbelastung durch die Ventilatoren de Wärmetauscher führen würden.

Eine kostenoptimale Lösung kann dagegen durch die sorgfältige Analyse der Stadtviertel mit einer kommunalen Wärmeplanung gefunden werden, wie sie in Dänemark seit 30 Jahren vorgeschrieben ist (Clausen & Beucker, 2019a). Eine solche Wärmeplanung ermittelt Stadtviertel, für die die Vollversorgung durch ein regeneratives Wärmenetz für den Durchschnitt aller Bewohner kostenoptimal ist. Höchste Effizienz der Wärmeversorgung wird dann langfristig durch eine Anschlusspflicht herbeige-

führt, die nach und nach zu einem Verschwinden anderer Heizsysteme aus dem Netzgebiet führt. Solche Wärmenetze sind ein „natürliches“ Monopol, welches durch eine staatliche Preiskontrolle überwacht werden muss (Clausen, 2020a; Clausen & Beucker, 2019b) oder die Gemeinnützigkeit der Wärmeversorger voraussetzt (Clausen & Beucker, 2019a). Als Wärmequelle stehen vielfältige Alternativen zur Verfügung, deren Potenzial im folgenden Kapitel kurz beschrieben wird. Hintergrundinformationen finden sich in der Studie „Regenerative Wärmequellen“ (Clausen, 2020b). Durch Erschließung einer optimalen Mischung dieser Wärmequellen kann nicht nur die Kosteneffizienz gesteigert, sondern auch die Versorgungssicherheit erhöht werden, weil unterschiedliche Wärmequellen unterschiedlichen Ausfallrisiken unterliegen.

Die Anforderungen an die Politik, ein solch komplexes und u.U. auch nicht ganz leicht kommunizierbares Wärmeversorgungssystem in allen Ortschaften einzuführen, sind hoch. Die richtungssichere Aufrechterhaltung einer Entscheidung für ein solches System sieht sich verschiedenen Gegnern gegenüber:

- Großen Energiekonzernen, denen dezentrale gemeinnützige Lösungen das aktuelle Geschäftsmodell erschweren oder entziehen,
- industriellen Befürwortern der „großen Lösung Wasserstoff“, die eine „schöne neue Welt des Wasserstoffs“ (Koch, 2020) schaffen wollen, von der aber die Bundesregierung selbst dokumentiert, dass sie bis mindestens 2040 keinen nennenswerten Beitrag zur Wärmeversorgung leisten wird (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020) sowie
- Anbietern von Biomasse und Biomasseheizwerken, die trotz deutlicher Signale, dass der Klimawandel die Versorgung mit Biomasse zunehmend unsicher macht, den kurzfristig machbaren Ausbau der Biomassenutzung ohne Ansehen ökologischer Schäden und hoher Preisrisiken bei Eintreten von Versorgungsengpässen vorantreiben.

Nicht zuletzt stellen auch die verbliebenen Klimawandelleugner ein Risiko dar, welches die Zustimmung zu entschlossenem und manchmal schmerzhaften Handeln der Politik in der Bevölkerung wie auch den Parteien unterminiert (Clausen & Beucker, 2020).

Sowohl die Aufstellung wie auch die richtungssichere Aufrechterhaltung eines wärmepolitischen Ziels, welches auf eine komplett regenerative, kostengünstige und in hohem Maße von Importen unabhängige Wärmeversorgung setzt, ist daher vermutlich nur mit einer parteiübergreifenden Koalition zu leisten.

In den folgenden Kapiteln wird die Basis für ein solches Handlungsprogramm gelegt:

- In Kapitel 2 werden die bundesweit vorhandenen Wärmepotenziale verschiedener Wärmequellen beschrieben.
- In Kapitel 3 wird darauf aufbauend ein beispielhaftes Szenario zu einer regenerativen Wärmeversorgung skizziert.

- Kapitel 4 stellt die verfügbaren bzw. notwendigen politischen Instrumente für die Umsetzung einer anspruchsvollen Wärmepolitik und ihre Wirkung auf die Skalierung der verschiedenen Wärmequellen dar.
- Kapitel 5 beschreibt eine kosteneffiziente Politikstrategie für die Transformation der Wärmeversorgung.

Dem Policy Paper liegen drei Studien zu Grunde, die die verfügbaren Wärmepotenziale, die politischen Instrumente und die Kernstrategien der Transformation im Detail beschrieben:

- Clausen, J. (2020). Regenerative Wärmequellen. Wärmepotentiale zur Versorgung der Landeshauptstadt Hannover. Hannover, Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J. (2020a). Transformation der Wärmeversorgung. Politisches Instrumentarium und Wachstumspotenziale. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J. & Fichter, K. (2020). Governance radikaler Systemtransformationen. Wirkung politischer Strategien und Instrumente in der Transformation großer Versorgungssysteme. Berlin: Borderstep Institut.

Sowie als Kurzfassung hierzu:

- Clausen, J. & Fichter, K. (2020): Governance radikaler Systemtransformationen. Wirkung politischer Strategien und Instrumente in der Transformation großer Versorgungssysteme. Policy Paper. Berlin: Borderstep Institut.

Alle Papiere stehen auf [www.borderstep.de](http://www.borderstep.de) zum Download bereit.

## 2 Wärmepotenziale in Deutschland

Der Bedarf an Wärme für Raumheizung und Warmwasser liegt gegenwärtig bundesweit bei ca. 550 TWh/a und wird bis 2050 auf ca. 300 bis 400 TWh/a zurückgehen (Umweltbundesamt, 2019, S. 169). Heute wird dieser Bedarf weitgehend durch die fossilen Energieträger Erdgas, Heizöl sowie Kohle- und erdgasbefeuerte Fernwärme-KWK gedeckt. Alternativ stehen verschiedene regenerative Energieformen zur Verfügung, die sich aber hinsichtlich der verfügbaren Menge und der zu erwartenden Preise deutlich unterscheiden.

### 2.1 Solarthermie

In Dronninglund in Nordjütland liefert das auf ca. 8 ha aufgebaute System aus Solarkollektoren und Saisonspeicher nach Abzug der Speicherverluste ca. 14.500 MWh/a an Wärme (Frey, 2018). Das entspricht ca. 1.800 MWh/ha. Im dänischen Silkeborg ist eine große Solarthermieanlage mit kleinem Wärmespeicher seit 2018 in Betrieb und liefert ca. 75.000 MWh/a. Eine Kollektorfläche von 15,7 ha wurde auf einer Landfläche von ca. 30 ha installiert. Es ergibt sich ein Flächenertrag von ca. 2.500 MWh/ha. Für größere Anlagen kann insoweit von einem Bruttoflächenbedarf für Solarkollektoren und Saisonspeicher von ca. 250 GWh/km<sup>2</sup> bzw. 0,25 TWh/km<sup>2</sup> ausgegangen werden.

In Deutschland werden gegenwärtig Energiepflanzen auf einer Fläche von 2,2 Mio. ha, also auf 22.000 km<sup>2</sup>, angebaut (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2020, S. 3)<sup>1</sup>. Würden nur 2% davon, also 440 km<sup>2</sup> stattdessen zur Produktion von solarthermischer Wärme genutzt, läge das jährliche Potenzial bei 108 TWh/a und eine Landfläche von 21.560 km<sup>2</sup> würde für andere Nutzungen frei. Sogar eine Doppelnutzung mit aufgeständerten Solarkollektoren und Ackerbau auf der Fläche darunter scheint möglich (Ökolandbau.de, 2020; Projekt APV-RESOLA, 2020). Alternativ wäre auch die Nutzung eines kleinen Teils von etwa 1% der Siedlungs- und Verkehrsfläche von zusammen 44.000 km<sup>2</sup>, z.B. auf Dächern oder durch aufgeständerte Anlagen über Parkplätzen, möglich. Genutzt werden bisher 8,5 TWh/a solarthermische Wärme, die durch 21 km<sup>2</sup> Kollektorfläche erzeugt werden (BSW Solar, 2020).

Bundesweites langfristiges (zusätzliches) Potenzial: 100 TWh/a.

### 2.2 Solare Wärme über Photovoltaik

Neben der direkten Gewinnung von Sonnenenergie durch die technisch vergleichsweise einfachen Flachkollektoren gibt es auch die Möglichkeit, im Sommer mit Photovoltaik-Strom zu gewinnen, mit diesem Strom eine Wärmepumpe anzutreiben und die Wärme wie auch bei der Solarthermie in ei-

---

<sup>1</sup> Auf diesen 2,2 Mio. ha wurde eine Menge von 145 TWh Energie gewonnen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 2019, S. 6), was ca. 66 MWh/ha entspricht. Der Ertrag von Strom aus Photovoltaik liegt mit 400 MWh um etwa das 6-fache höher, der Ertrag von über PV erzeugter Wärme um das 18-fache und der von Solarthermie mit 2.500 MWh/ha um etwa das 38-fache.



nen Saisonspeicher einzuspeichern. Im Vergleich zur großen Solarthermie stellt sich diese Technologie wie folgt dar:

- Statt der Flachkollektoren werden PV-Solarmodule benötigt.
- Für beide Technologien ist eine Wärmepumpe erforderlich. Bei der Solarthermie dient sie dazu, die Wärme aus dem langsam kälter werdenden Saisonspeicher auf Netztemperatur zu bringen, im PV-System wird sie zusätzlich zur Befüllung des Speichers genutzt.
- Für beide Technologien ist ein Saisonspeicher erforderlich.

Der große Vorteil des PV-Systems ist, dass der Strom nicht in der Nähe des Saisonspeichers erzeugt werden muss, er kann mit nur geringen Verlusten von dort kommen, wo ausreichend Platz für Solar-Anlagen vorhanden ist. Zudem sollte man die Windkraft mitdenken, denn beide in Ergänzung kommen zu deutlich besseren Lastabdeckung als die Sonne allein.

Der Hektarertrag einer Photovoltaik-Freiflächenanlage liegt etwa bei 400 bis 500 MWh/ha (Märtel, 2020), also bei etwa 40 bis 50 GWh/km<sup>2</sup>. Wird diese Strommenge durch eine Wärmepumpe mit einer mittleren Arbeitszahl von 3 auf das notwendige Temperaturniveau gepumpt, resultiert ein Ertrag von ca. 120 GWh/km<sup>2</sup>.

Wie oben bereits angeführt, werden in Deutschland gegenwärtig Energiepflanzen auf einer Fläche von 2,2 Mio. ha, also auf 22.000 km<sup>2</sup>, angebaut. Würden nur 4%, also ca. 880 km<sup>2</sup>, davon stattdessen oder in Doppelnutzung von Energie und Landbau zur Produktion von „photovoltaischer“ Wärme genutzt, läge das jährliche Potenzial bei 100 TWh/a. Alternativ wäre auch die Nutzung eines kleinen Teils von etwa 2% der Siedlungs- und Verkehrsfläche von zusammen 44.000 km<sup>2</sup>, z.B. auf Dächern oder durch aufgeständerte Anlagen über Parkplätzen, möglich.

Bundesweites langfristiges (zusätzliches) Potenzial: 100 TWh/a.

## 2.3 Dezentrale Wärmepumpen

Das Umweltbundesamt erwartet von Erdwärmepumpen in 2050 einen Beitrag von bis zu 46,3 % zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung und von Luftwärmepumpen zusätzliche 28,3 % (Umweltbundesamt, 2019, S. 173). Dies ist als eine sehr optimistische Annahme einzustufen. Zusammen entspricht dies einem Anteil von Wärmepumpen an der Wärmeversorgung von etwa 75% und einer insgesamt bereitgestellten Wärmemenge von ca. 250 TWh/a (Umweltbundesamt, 2019, S. 172). Die zur Bereitstellung dieser Wärmemenge erforderliche Strommenge – primär im Winterhalbjahr - liegt damit, je nach durchschnittlich realisierter Jahresarbeitszahl (JAZ zwischen 2 und 3), bei 80 bis 125 TWh/a. Das bisher realisierte Potenzial zur Beheizung von Wohnungen beträgt ca. 13 TWh/a (AG Energiebilanzen, 2020).

Bundesweites langfristiges (zusätzliches) Potenzial: 240 TWh/a.

## 2.4 Abwärme

Für Deutschland errechnen Pehnt und Bödecker (2010) ein nationales Abwärmepotenzial von ca. 90 TWh/a, bei einer Temperatur über 140°C, und zusätzlich 45 TWh/a, bei Temperaturen zwischen 60°C und 140°C, über deren Nutzung wenig bekannt ist. Zusammen mit der Information des AGFW (2019, S. 9), dass in ihren Netzen in 2018 nur etwa 4,7 TWh/a industrielle Abwärme eingespeist wurden, ergibt sich die Vermutung, dass ein Wärmepotenzial von zusammen ca. 125 TWh/a weitgehend ungenutzt ist. Berechnungen des Instituts für Zukunftsenergiesysteme (IZES) ermitteln sogar über 200 TWh/a an theoretischen Abwärmepotenzialen aus dem produzierenden Gewerbe (Grote, Hoffmann & Tänzler, 2015, S. 75).

Bundesweites langfristiges (zusätzliches) Potenzial: 125 TWh/a.

## 2.5 Tiefe Geothermie

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) dokumentiert für Europa zwar ein technisches Potenzial von über 250 TWh/a geothermischer Wärme (und darüber hinaus 2.800 TWh/a geothermischen Strom), weist aber ergänzend darauf hin, dass die Verwendung des Begriffes „technisches Potenzial“ zur Zeit wenig sinnvoll wäre, da die Technologie zur Gewinnung der tiefen Geothermie, insbesondere für die petrothermale Geothermie, noch nicht hinreichend entwickelt ist (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2019, S. 153). Das Leibnizinstitut für angewandte Geophysik schätzt aktuell den möglichen Beitrag der geothermischen Wärme auf 104 TWh/a (Leibnizinstitut für angewandte Geophysik, 2018, S. 10). Auch aus Sicht der einschlägigen Fachverbände liegt das Wärmepotenzial der tiefen Geothermie bei ca. 100 TWh/a (AGFW e.V., Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE), Verband kommunaler Unternehmen & Bundesverband Geothermie, 2019). Die installierte Wärmeleistung 2018 lag bei 374 MW mit einem jährlichen Wärmeoutput von 1,38 TWh (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2019, S. 150).

Bundesweites langfristiges (zusätzliches) Potenzial: 100 TWh/a

## 2.6 Power-to-Gas und Kraft-Wärme-Kopplung

Das bisher in Deutschland verfügbare Potenzial an Elektrolyseuren für die Produktion von Wasserstoff ist gemessen an dem mittelfristigen Bedarf der Energieversorgung minimal. Mit einer Kapazität der deutschen Elektrolyseanlagen von ca. 100 MW<sub>el</sub> (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH, 2018) können theoretisch ca. 530 GWh/a grüner Wasserstoff hergestellt werden. Die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie erwartet, dass diese Produktion bis 2025 auf ca. 8 TWh/a gesteigert werden kann (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH, 2018, S. 6). Bis 2030 sieht die deutsche Wasserstoffstrategie eine Produktion von ca. 14 TWh/a als realisierbar an (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020):

*Die Bundesregierung sieht bis 2030 einen Wasserstoffbedarf von ca. 90 bis 110 TWh. Um einen Teil dieses Bedarfs zu decken, sollen bis zum Jahr 2030 in Deutschland Erzeugungsanlagen von*

*bis zu 5 GW Gesamtleistung einschließlich der dafür erforderlichen Offshore- und Onshore-Energiegewinnung entstehen. Dies entspricht einer grünen Wasserstoffproduktion von bis zu 14 TWh und einer benötigten erneuerbaren Strommenge von bis zu 20 TWh. .... Für den Zeitraum bis 2035 werden nach Möglichkeit weitere 5 GW zugebaut, spätestens bis 2040.*

Alleine für die anders kaum zu deckenden Energiebedarfe der Stahlbranche, des Feedstocks für die chemische Industrie und der Prozesswärme hoher Temperaturen sind 350 bis 450 TWh Wasserstoff pro Jahr erforderlich (Lechtenböhrer, Samadi, Leipprand & Schneider, 2019, S. 12).

Die zu erwartenden Kosten der Heizung mit „grünem Methan“ lassen sich auf Basis von Preisschätzungen von Agora Verkehrs- und Energiewende (Perner, Unteutsch & Lövenich, 2018, S. 46) und von Angaben der Bundesnetzagentur zu den Komponenten des Erdgaspreises (Bundesnetzagentur, 2019a) auf ca. 18 Cent/kWh in 2030 und ca. 14 Cent/kWh in 2050 abschätzen.

Bundesweites langfristiges (bis 2040) Potenzial an Wasserstoff für die Wärmeversorgung: 10 TWh/a.<sup>2</sup>

## 2.7 Power-to-Heat

Die Bundesnetzagentur dokumentiert noch für 2009 einen kleinen jährlichen Stromüberschuss von nur 73,7 GWh/a, der sich bis 2013 etwa verzehnfachte und dann ab 2015 sprunghaft auf ca. 5 TWh/a anstieg (Bundesnetzagentur, 2019b, S. 141). Die Frage der Bedeutung dieses Potenzials für die Heizung von Gebäuden hängt von der zukünftigen Entwicklung des Potenzials an Überschussstrom ab. Diese Entwicklung wiederum hängt entscheidend von der Entwicklung des Kraftwerksparks ab. Je höher die Zahl von „must run“-Kraftwerken wie Atom- oder Kohlekraftwerken ist, desto weniger besteht die Chance, eine erhöhte Erzeugung bei intensiver Sonneneinstrahlung oder viel Wind durch das Herunterfahren anderer Kapazitäten zu kompensieren. Nun ist aber zu berücksichtigen, dass der Atomausstieg für 2022 beschlossen ist und der Kohleausstieg ebenfalls in den nächsten 10 bis maximal 15 Jahren zu einem weitgehenden Verschwinden von Kohlekraftwerken aus der deutschen Stromerzeugung führen wird. Schill (2014, S. 11) zeigt einen deutlichen Effekt eines niedrigen Anteils an „must run“-Kraftwerken auf die Überschüsse. Bei 20 GW „must run“-Kraftwerken errechnet er für 2032 einen Überschuss von 28,6 TWh/a, ohne diese Kraftwerke, also bei 0 GW „must run“, bleiben die Überschüsse im Vergleich zu den aktuellen Werten annähernd konstant. Der Vergleich mehrerer Prognosen durch Plenz (2016, S. 8) lässt bis 2050 minimal 10 TWh/a, maximal ca. 30 TWh/a erwarten. Die Überschüsse würden im flexiblen „no must run“-Szenario von Schill (2014, S. 15) verteilt auf ca. 1.600 Stunden im Jahr anfallen, die überwiegende Menge des Überschusses konzentriert sich

---

<sup>2</sup> Auch die Wasserstoffstrategie (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2020, S. 11) bleibt mit Blick auf einen Beitrag zur Wärmeversorgung unklar: „Auch langfristig wird nach Ausschöpfen der Effizienz- und Elektrifizierungspotenziale bei der Prozesswärmeerstellung oder im Gebäudesektor ein Bedarf an gasförmigen Energieträgern bestehen bleiben. Wasserstoff und seine Folgeprodukte können langfristig auf verschiedene Weise einen Beitrag zur Dekarbonisierung von Teilen des Wärmemarkts leisten.“

letztlich auf wenige hundert Stunden im Jahr<sup>3</sup>. Die bisher realisierte Power-to-Heat Nutzung dürfte klein sein und wird auf eine TWh/a veranschlagt.

Bundesweites langfristiges (zusätzliches) Potenzial: 20 TWh/a

## 2.8 Bioenergie

In der letzten BMU-Studie zu „Erneuerbaren Energien in Zahlen“, die noch Aussagen zum insgesamt realisierbaren Potenzial macht, wird das insgesamt zur Wärmeversorgung zur Verfügung stehende Bioenergie-Potenzial auf ca. 170 TWh/a veranschlagt, von denen in 2010 bereits 125,3 TWh/a genutzt wurden (Bundesministerium für Umwelt, 2011, S. 53). Bis 2018 ist dieser Wert auf ca. 132 TWh/a gestiegen (Umweltbundesamt, 2019, S. 127). Das restliche Potenzial liegt damit bei ca. 38 TWh/a. Mit Blick auf den umweltpolitischen Vorschlag der Einstellung der Produktion von Anbaubiomasse zur energetischen Nutzung, erwartet das Umweltbundesamt aber schon bis 2030 eine deutlich zurückgehende energetische Nutzung von Biomasse (Umweltbundesamt, 2019, S. 129). Das zusätzlich erschließbare Potenzial liegt damit langfristig nahe 0.

Bundesweites langfristiges (zusätzliches) Potenzial: 0 TWh/a

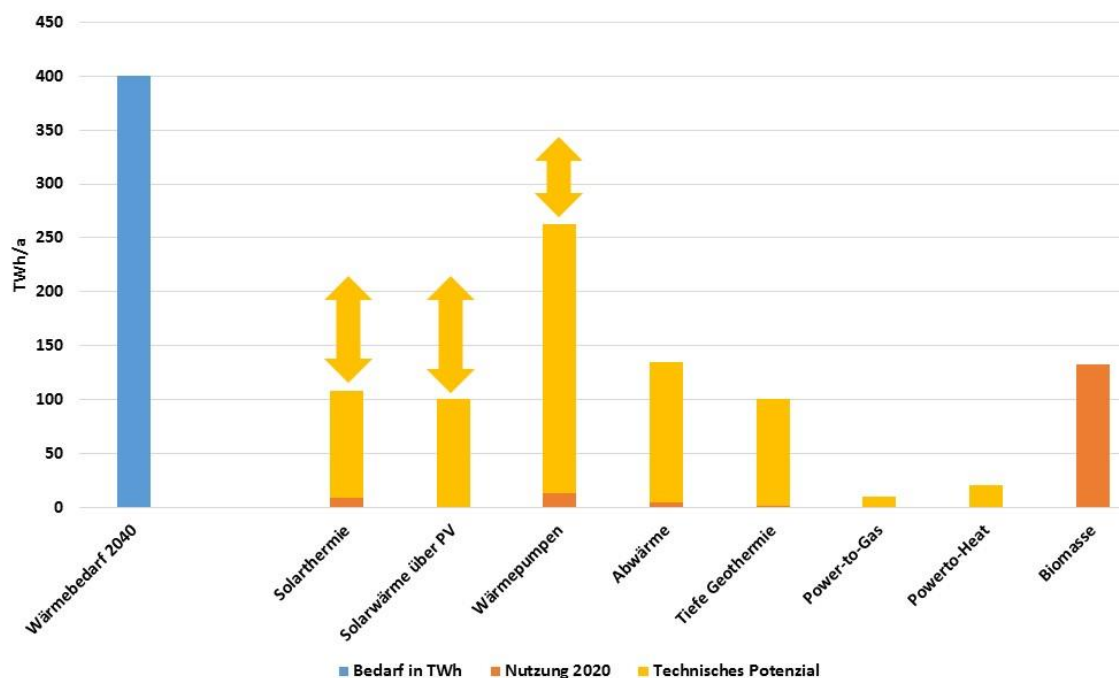
## 2.9 Wärmepolitik muss die tatsächlichen Wärmepotenziale berücksichtigen

Im Überblick stellen sich die nationalen Potenziale (mögliche Importe werden nicht berücksichtigt) wie folgt dar. Nur mit einem klaren Blick auf die notwendigen Potenziale kann Wärmepolitik verantwortlich gestaltet werden.

---

<sup>3</sup> Ein Jahr hat 8.760 Stunden.

Abbildung 1: Nationale Wärmepotenziale in Relation zum Wärmebedarf für Heizung und Warmwasser



Quelle: Borderstep

Unter den insgesamt acht Energieformen sind zunächst drei weniger aussichtsreiche Optionen:

**Biomasse**, bei der zwar erhebliche Potenziale vorhanden sind, die aber durchweg schon genutzt werden. Etwa noch vorhandene Potenziale sollten aus Sicht des Umweltbundesamtes dazu verwendet werden, aus der Nutzung von Anbaubiomasse und Waldrestholz weitgehend auszusteigen. Waldholz sollte ebenfalls nicht zum Heizen, sondern als Bauholz oder für andere stoffliche Nutzungen Verwendung finden. Ein nutzbares Restpotenzial ist kaum auszumachen. Bestenfalls lassen sich durch den Klimawandel wegbrechende Ressourcen durch die Erschließung bisher wenig genutzter Potenziale ersetzen.

**Power-to-Heat**, deren Basis an preiswertem Strom aus Netzabriegelung dauerhaft eher klein ist.

**Power-to-Gas** (grüner Wasserstoff oder grünes Methan), mit deren wettbewerbsfähiger Verfügbarkeit zum Heizen vor 2050 kaum zu rechnen ist.

Die Erschließung der anderen fünf Energieformen erscheint zwar in großen Mengen möglich, ist aber in allen Fällen mit Herausforderungen verbunden, die nur durch eine richtungssichere und entschlossene Wärmepolitik überwunden werden können.

**Solarthermie** ist als Dachanlage auf Einzelhäusern nutzbar und liefert hier einen solaren Deckungsgrad am Wärmeverbrauch von ca. 15 % und kann so den Stromverbrauch bei Heizung mit Wärmepumpe reduzieren. Ähnlich wie auch bei Photovoltaikanlagen (PV), halten sich aber die meisten Hausbesitzer mit der Investition in Solarthermie oder PV zurück. Eine Bundes- oder Landesvorschrift, die im Fall der Renovierung von Dächern die Montage solcher Anlagen vorschreibt, wäre Bestandteil einer richtungssicheren Wärmepolitik.

**Große Solarthermieanlagen** können genauso wie große Freiflächen-PV-Anlagen kombiniert mit Wärmepumpen im Sommer große Wärmemengen in Saisonalspeicher einspeisen. Für solche Anlagen können Dach- und, mit aufgeständerten Kollektoren, auch Verkehrsflächen genutzt werden. Im Zuge der Klimaanpassung ist aber auch die Kombination mit landwirtschaftlicher Nutzung der Flächen attraktiv. Aufgeständerte Kollektoren oberhalb von landwirtschaftlichen Flächen vermindern die Sonneneinstrahlung, reduzieren die Temperatur und verändern das Mikroklima positiv. In den immer heißeren Sommern und insbesondere in Trockenregionen könnte man die Module zur Steuerung des „Wasser- und Schattenhaushalts“ nutzen und so eine klimaangepasste Landwirtschaft fördern. Damit sich solche Anlagen rechnen, müsste eine Doppelnutzung der Fläche zugelassen und die Flächenprämie weitergezahlt werden (Ökolandbau.de, 2020). Da das dargestellte Potenzial nur durch die Flächenverfügbarkeit begrenzt wird, deuten die Pfeile an, dass es auch größer ausfallen kann.

**Wärmepumpen** erreichen nur dann hohe Arbeitszahlen, wenn sie in energieeffiziente Gebäude eingebaut werden. Ihre Anwendung ist also an hohe Investitionen in die energetische Sanierung gekoppelt. Da das dargestellte Potenzial nur durch die Verfügbarkeit von Elektrizität begrenzt wird, deuten die Pfeile an, dass es auch größer ausfallen kann.

**Abwärme** ist nicht überall verfügbar und muss zunächst in Katastern erfasst und im Fall der Nutzung durch den Bau von Wärmeleitungen erschlossen und ggf. durch Wärmepumpen auf Netztemperatur gebracht werden. Der Netzbetreiber steht hierbei immer der Unsicherheit gegenüber, wie lange der Anbieter der Abwärme wirtschaftlich erfolgreich sein wird und liefern kann. Dies Risiko könnte z.B. durch einen öffentlichen Fonds versichert werden.

**Tiefe Geothermie** ist ebenfalls mit einem Risiko verbunden, nämlich dem der Fündigkeit der Bohrung. Auch hier wäre die Versicherung durch einen öffentlichen Fonds anzudenken.

### 3 Ein Szenario der Wärmeversorgung

Mit Blick auf die Potenziale lässt sich ein Szenario entwerfen, welches einen Hinweis auf die Notwendigkeit der Skalierung der Nutzung einzelner Wärmequellen gibt. Das Szenario geht von einem Wärmebedarf von 400 TWh in 2040 aus, der je zur Hälfte durch Wärmenetze und Versorgung von Einzelgebäuden gedeckt wird.

Diese Aufteilung mit einem hohen Anteil der Versorgung durch Wärmenetze begründet sich primär an der Orientierung an den Beispielen Dänemark und Schweden. Obwohl in beiden Ländern ein hoher Anteil regenerativer Wärme von über 60% genutzt wird, sind die Wärmekosten mit denen in Deutschland vergleichbar<sup>4</sup>. Neben der Steuerung der Transformation durch hohe CO<sub>2</sub>-Preise, spielt gerade auch die auf niedrige Kosten für die Verbraucher gerichtete Wärmeplanung mit ihrer Ausrichtung auf die kosteneffizienteste und für ein Gebiet am besten geeignete Wärmeversorgungsoption eine bedeutende Rolle (Chittum & Østergaard, 2014, S. 2). In 241 von insgesamt 275 Kommunen in Dänemark besteht eine Anschlusspflicht an das Wärmenetz (Danish Energy Authority, 2005, S. 25). Für die aus dem Szenario folgenden Überlegungen spielt es jedoch keine Rolle, ob sich der Anteil der Versorgung durch Wärmenetze letztlich bei 35 %, 40 % oder 50 % einpendelt. Es ist lediglich wichtig, dass ein deutlicher Ausbau der Netze gerade aus Gründen der Kosteneffizienz sinnvoll erscheint. Zudem ermöglichen Wärmenetze die Einspeisung verschiedener Wärmequellen und erhöhen so die Versorgungssicherheit.

Ähnliches gilt auch für die folgenden Überlegungen zu den möglichen Versorgungsanteilen verschiedener Wärmequellen. Auch hier geht es an dieser Stelle nicht um einen genauen Gesamtentwurf, sondern um die Begründung der Überlegung, dass eine ganze Gruppe von Wärmequellen entschlossen skaliert werden muss, um die Grundlage einer regenerativen Wärmeversorgung in 20 Jahren zu schaffen.

Für die Versorgung von Einzelgebäuden kann die Solarthermie einen Beitrag von bis zu 15% leisten, was ca. 30 TWh/a entspricht, und etwa 4-mal soviel ist wie der gegenwärtige Umfang der Nutzung der Solarthermie. Ein tendenziell sinkender Anteil von ca. 10 % (20 TWh/a) könnte u. U. durch Biomasse gedeckt werden (analog zu DLR, Fraunhofer IWES & IfnE, 2011) . Der Restbedarf von 150 TWh/a müsste durch Wärmepumpen gedeckt werden, für deren Betrieb ein Strombedarf von ca. 50 bis 75 TWh/a entstehen würde.

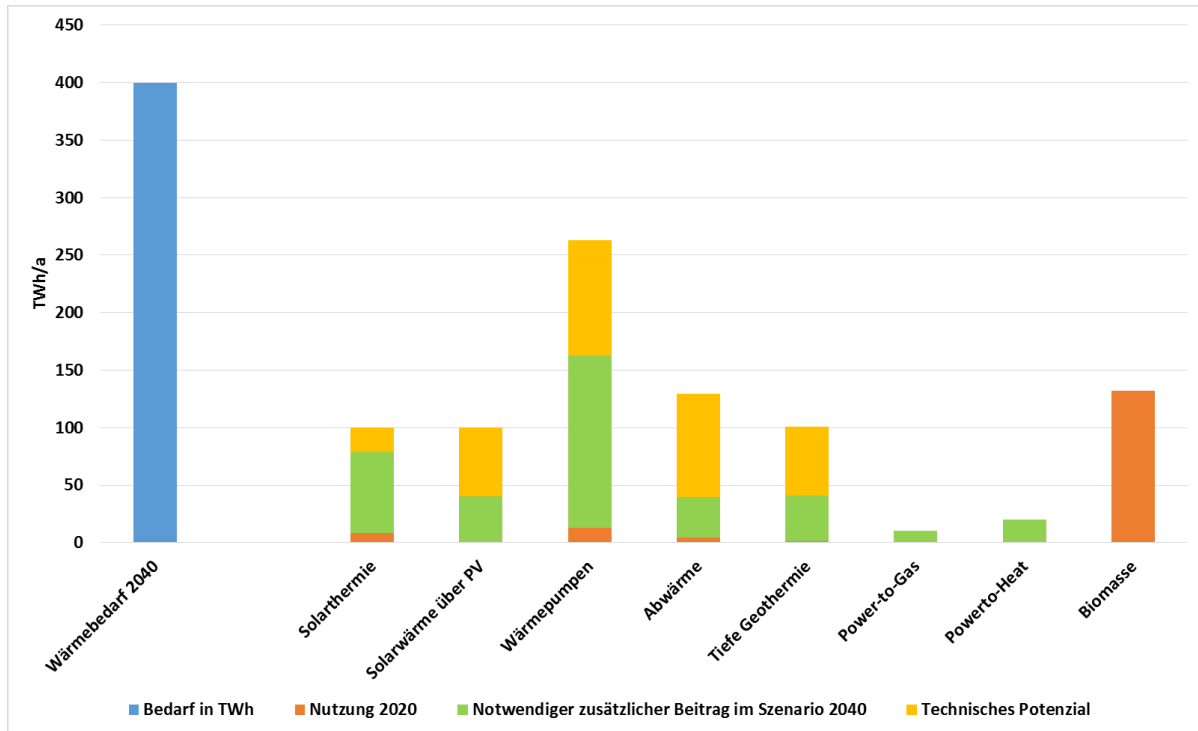
Zur regenerativen Wärmegewinnung von 200 TWh/a zur Versorgung der Wärmenetze könnten 30 TWh/a Biomasse, 10 TWh Power-to-Heat und weitere 10 TWh Power-to-Gas beitragen. Zur Deckung der verbleibenden 150 TWh/a stehen solarthermische Großanlagen, photovoltaische Wärmegewin-

---

<sup>4</sup> Der durchschnittliche Wärmepreis für dänische Haushalte lag nach Angabe von Forum Energii 2015 bei 8 Cent/kWh und damit 0,6 Cent oder 8% höher als in Deutschland (Forum Energii, Agora Energiewende & DBDH, 2018, S. 31). Der Abgabepreis für Wärme lag in den schwedischen Fernwärmenetzen 2013 zwischen 6 und 10 Cent/kWh, in etwa der Hälfte der Netze unterhalb von 8 Cent/kWh (Sköldberg & Rydén, 2014, S. 43).

nung (mit Saisonalspeicher), Abwärmenutzung und Geothermie zur Verfügung, die jeweils ca. 30 bis 60 TWh/a leisten müssten.

**Abbildung 2: Szenario zur Deckung eines Wärmebedarfs von 400 TWh für Heizung und Warmwasser in 2040**



Quelle: Borderstep

Es wird deutlich, dass die gegenwärtig veranschlagten technischen Potenziale zur Deckung des Wärmebedarfs mehr als ausreichen. Es wird aber auch deutlich, dass sich das Interesse der wirtschaftlichen Akteure gegenwärtig auf die Potenziale konzentriert, die entweder bereits ausgeschöpft sind oder langfristig klein oder (zu) teuer bleiben werden.

Mit Blick auf den Umfang des Einsatzes aller dieser Technologien ist weiter ein breit angelegter Fahrplan zur Kostensenkung erforderlich. Ähnlich der holländischen Strategie des seriellen Sanierens zur Senkung der Sanierungskosten (Clausen, 2019), sollten Kostensenkungsstrategien für Wärmepumpen, den Bau von Wärmenetzen, solarthermische Kollektoren und Saisonalspeicher erarbeitet werden, um die Pfadwechselkosten niedrig zu halten, und so bei allen betroffenen Akteuren die Akzeptanz zu erhöhen. Solche Maßnahmen können die Pfadwechselkosten enorm senken. Werden z.B. die Sanierungskosten zur Erreichung eines für Wärmepumpen ausreichenden Energiestandards um 100 €/m<sup>2</sup> gesenkt, senkt dies die Renovierungskosten der durchschnittlich pro Person genutzten Wohnfläche von 45 m<sup>2</sup> von insgesamt ca. 83 Millionen Menschen in Deutschland, von denen ca. ¼ in sanierungsbedürftigen Gebäuden leben, um insgesamt knapp 400 Milliarden €.



## 4 Politische Instrumente zur Förderung der Wärmewende

Wie zahlreiche internationale Politikbeispiele und langjährige Untersuchungen der Innovations- und Transformationsforschung zeigen, müssen zur Förderung einer Wärmewende verschiedene politische Instrumente eingesetzt werden und synergetisch zusammenwirken.

Die Instrumente der **Wirtschafts- und Innovationsförderung** setzen darauf, ein Angebot zuverlässiger regenerativer Wärmequellen zu schaffen, einige **spezifische Instrumente** sind für die Verbreitung einzelner Lösungen von hoher Bedeutung und **transformativen Rahmenbedingungen** schaffen grundsätzliche Voraussetzungen zugunsten regenerativer Energieformen.

Zentrale Instrumente sind der **Wirtschafts- und Innovationsförderung** zuzuordnen. Das Wachstum einzelner Firmen und Sektoren ist überall dort erforderlich, wo die Anbieterstruktur gegenwärtig nicht ausreicht, die Umsetzung der Wärmewende zu realisieren. „Sektorwachstum“ wird hier als Mittel des Strukturwandels für Klimaschutz und hin zu einer nachhaltigen und klimaneutralen Wirtschaftsweise verstanden. Als Instrumente zur Förderung des Wachstums werden die „sektorale Wirtschafts- und Gründungsförderung“, die „F&E Förderung“ sowie die „Förderung von Machbarkeitsstudien und Demonstrationsanlagen“ verstanden. Besonders schnelles Wachstum bedarf der konkreten und auf die einzelnen Unternehmen bezogenen Wirtschaftsförderung, z.B. durch die Verfügbarkeit von Gewerbeflächen, aber auch von gut ausgebildetem Personal und Investitionsmitteln. Die schnelle Realisierung eines klimaneutralen Gebäudebestands bedarf der Unterstützung der Ausbildung im Handwerk und in der Baubranche, aber auch der Entwicklung von Contracting-Angeboten und der Unterstützung der Bildung von Beschaffungsgruppen. Auch die Förderung von innovativen Gründungen ist von Bedeutung. Durch F&E Förderung wie auch durch die Förderung von Machbarkeitsstudien und Demonstrationsanlagen können einige Technologien, die noch am Anfang der Marktdurchdringung stehen, marktreifer, kostengünstiger und bekannter gemacht werden. Ein durch Wirtschaftsförderung erreichtes Wirtschaftswachstum „nachhaltiger Sektoren“ ist für die Politik dabei auch ein wesentliches Ergebnis der Transformation, da sich durch steigende Umsätze und eine wachsende Beschäftigung zentrale Ziele der Wirtschafts- und Arbeitsmarktpolitik erreichen lassen.

Aus der Gruppe der **spezifischen Instrumente** wirkt z.B. das Maßnahmenpaket grüne Fernwärme auf alle netzgebundenen Wärmelösungen. Weiter sind Änderungen am Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz sowie ein Geothermie Risikofonds und die Ermöglichung der Doppelnutzung von landwirtschaftlichen Flächen zur Erzeugung von Energie und Feldfrüchten erforderlich.

Zu **transformativen Rahmenbedingungen** tragen die kontinuierliche Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises, eine die Sektorkopplung fördernde Strompreisregulierung, z.B. durch Sonderkonditionen für Wärmepumpen, die Änderung verschiedener ordnungsrechtlicher Vorschriften wie z.B. die Verpflichtung zur Aufstellung kommunaler Wärmepläne bei. Durch gezielte Verbote kann Raum für die Verbreitung nachhaltiger Lösungen geschaffen und die Exnovation, also das Hinausschaffen nicht nachhaltiger Technologien wie z.B. Ölheizungen, vorangetrieben werden (Clausen & Fichter, 2020). Auch die Frage

der Mobilisierung der erheblichen finanziellen Ressourcen, die für die Transformation aufgewendet werden müssen, muss durch die Politik mit beantwortet werden.

**Tabelle 1: Einsatz wirtschafts-, innovations- und energiepolitischer Instrumente bezogen auf die technologischen Wärmepotenziale**

	Einzelgebäude		Fernwärme					
	Wärmepumpe	Gebäude-Sanierung	Abwärme	Große Solarthermie	Tiefe Geothermie	Solare Wärme PV	Power-to-Heat	KWK
Wachstums- und Innovationsförderung								
Wirtschafts- und Gründungsförderung		X	X	X	X			
F&E Förderung	X	X	X	X	X			
Förderung von Machbarkeitsstudien und Demonstrationsanlagen				X	X			
Ausbildung im Handwerk und in der Baubranche	X	X						
Beschaffungsgruppen	X	X						
Entwicklung von Contracting Ausbildung - Angeboten	X	X						
Spezifische Instrumente								
Maßnahmenpaket grüne Fernwärme			X	X	X	X	X	X
Abschaffung KWK-Bonus und Vorhaltepflcht von KWK-Anlagen								X
Geothermie Risikofonds					X			
Doppelte Nutzung landwirtschaftlicher Flächen				X		X		
Transformative Rahmenbedingungen								
CO <sub>2</sub> -Bepreisung	X	X	X	X	X	X	X	X
Strompreis und seine Komponenten	X	X	X	X	X	X	X	X
Ordnungsrecht und Exnovationsinstrumente	X	X	X	X	X	X	X	X
Ressourcenbereitstellung	X	X	X	X	X	X	X	X
Geografische Wärmeplanung der Kommunen	X	X	X	X	X	X		X

Quelle: Borderstep

Im Detail sind diese Instrumente in der Studie „Transformation der Wärmeversorgung. Politisches Instrumentarium und Wachstumspotenziale“ (Clausen, 2020a) dargestellt.

Die Tabelle zeigt die Auswirkung bestimmter umweltpolitischer und innovationspolitischer Instrumente auf die verschiedenen Wärmetechnologien im Überblick und stellt dabei den Bezug der einzelnen politischen Instrumente zu den im vorangegangenen Kapitel geschilderten Wärmepotenzialen her. Dabei nimmt die Tabelle nur diejenigen Technologien auf, deren Weiterentwicklung und Diffusion z.Zt. stark behindert wird bzw. nicht vorangeht. Eine gegenüber dem ohnehin schon bestehenden Niveau noch weitergehende Förderung der Nutzung von Biomasse zu Heizzwecken scheint z.B. mit Blick auf zahlreiche kritische Positionen und die zukünftigen Versorgungs- und Preisrisiken nicht sinnvoll und wird daher in der Tabelle nicht aufgeführt. Auch die Förderung des Ausbaus von Power-to-Gas/Liquid scheint mit dem spezifischen Fokus auf Wärmeversorgung für die nächsten Jahre aufgrund zu langsamer Skalierung und zu geringer Wirtschaftlichkeit der Nutzung als Niedertemperatur-Wärme nicht relevant. Diese Aussage berührt nicht den Sinn einer entsprechenden Förderung zur Deckung von Prozesswärmebedarfen durch Wasserstoff in industriellen Prozessen u. dgl. mehr.

Da durch Kommunikation und Information die Wahrscheinlichkeit der Nutzung aller Technologievarianten erhöht werden kann, ist dieses Instrument in der Tabelle nicht aufgeführt. Informations- und Kommunikationsinstrumente müssen alle anderen Instrumente begleiten, auf sie aufmerksam machen und den Akteursgruppen ihre Chancen und Verpflichtungen bewusst machen.

**Tabelle 2: Akteure der Transformation und Instrumente**

<b>Instrumente</b>	<b>Aktive Akteure</b>	Bundes- regierung	Landes- regierungen	Kommunen	Wirtschaft / Unternehmen
Sektorale Wachstums-, Gründungs- und Innovationsförderung		X	X	X	
F&E Förderung		X			
Förderung von Machbarkeitsstudien und Demonstrationsanlagen		X	X		
Ausbildung in Handwerk und Baubranche				X	X
Beschaffungsgruppen				X	X
Entwicklung von Contracting-Angeboten					X
Maßnahmenpaket grüne Fernwärme		X			
Abschaffung KWK-Bonus und Vorhaltepflcht von KWK-Anlagen		X			
Geothermie Risikofonds			X		
Doppelte Nutzung landwirtschaftlicher Flächen		X		X	
CO <sub>2</sub> -Bepreisung		X			
Der Strompreis und seine Komponenten		X			
Ordnungsrecht und Exnovationsinstrumente		X	X		
Ressourcenbereitstellung		X	X	X	X
Kommunale geografische Wärmeplanung			X	X	

Quelle: Borderstep

Letztlich kann eine Wärmewende mit ihren positiven Auswirkungen auf den Klimaschutz, aber auch auf den Arbeitsmarkt und die Unternehmen nur gelingen, wenn die Instrumente gut orchestriert eingesetzt werden. Dafür müssen verschiedene Akteure kooperieren.

Das Hamburgische Klimaschutzgesetz (Hansestadt Hamburg, 2020) setzt dabei exemplarisch einen Rahmen durch die Landespolitik. Es enthält mit Blick auf die Transformation der Wärmeversorgung z.B. Vorschriften zu einem Anschluss- und Benutzungsgebot an Wärmenetze (§ 8), zur Beendigung der Nutzung von Wärme aus Kohleverbrennung in Wärmenetzen (§ 9), zur Ausstellung von Dekarbonisierungsfahrplänen für Wärmeversorgungsunternehmen (§ 10) und zur Nutzung erneuerbarer Wärme in Einzelgebäuden (§ 17). Weiter regelt es die kommunale Pflicht zur Wärme- und Kälteplanung mit dem Ziel der Identifizierung von energie- und kosteneffizienten Maßnahmen in einer räumlichen Gebietseinheit (§ 25) sowie die Pflicht zur Aufstellung eines Wärmekatasters (§ 26).

## 5 Eine kosteneffiziente Politikstrategie für die Wärmewende

In der Auswertung nationaler und internationaler Erfolgsbeispiele zum gezielten grundlegenden Umbau von großen Versorgungssystemen aus dem BMBF-geförderten Projekt „Go“ konnten vier Basisstrategien herausgearbeitet werden, die zu einer erfolgreichen Transformation beitragen und für diese grundlegend sind (Clausen & Fichter, 2020, S. 44f).

Ausgangspunkt sind immer politisch klar definierte Nachhaltigkeitsziele wie z.B. im Klimaschutz sowie Pläne für die Transformation, welche die Grundlage für die **Entwicklung und Aufrechterhaltung von Richtungssicherheit** sind (Basisstrategie 1). In der Frühphase der Transformation liegt dann der Schwerpunkt auf **Innovationspolitik und Nischenbildung** (Basisstrategie 2).

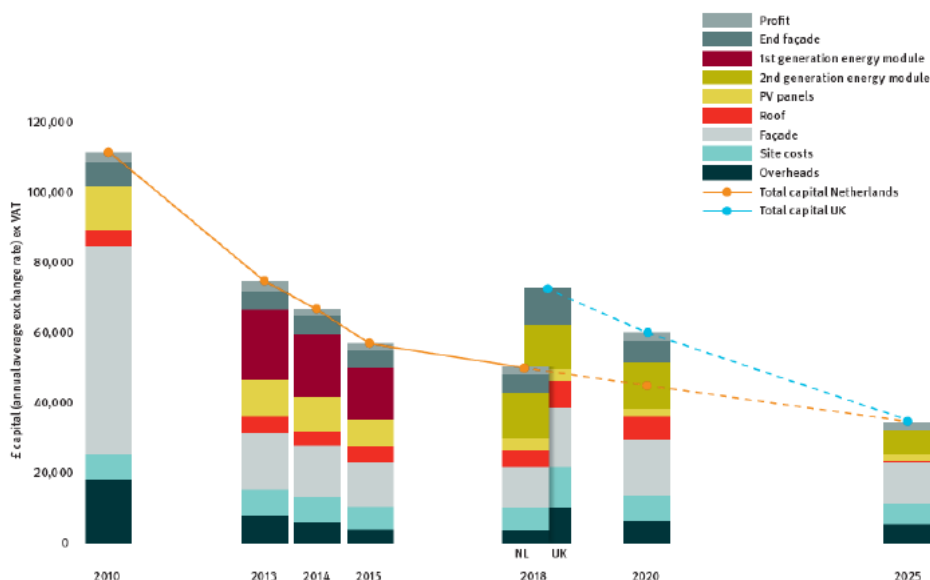
In der heißen Phase der Transformation stehen wirkmächtige Instrumente im Vordergrund der Politik, die die **Synchronisation von Diffusion und Exnovation** voranbringen (Basisstrategie 3). Sie sorgen dafür, dass sich nachhaltige Produkte und Lösungen verbreiten und nicht-nachhaltige Produkte und Lösungen zurückgedrängt werden. Wie unsere Fallstudien gezeigt haben, kommt es bei radikalen, d.h. grundlegenden Systemtransformationen auch immer darauf an, dass die notwendigen Infrastrukturen (Strom-, Wärme-, Wassernetze, Schienenwege, Prüf- und Zertifizierungsinstitutionen usw.) durch staatliches Handeln und staatliche Förderung gezielt entwickelt oder neu geschaffen werden. Die **Infrastrukturentwicklung** ist damit die Basisstrategie 4.

Insgesamt geht es darum, durch die Transformation der Wärmeversorgung Produkte und Lösungen durchzusetzen, die das Land der Klimaneutralität möglichst rasch näherbringen, dabei aber auch bezahlbar bzw. finanzierbar sind. **Mehrheitsfähige Lösungen sind also nicht nur umweltfreundlich, sondern auch möglichst kostengünstig.** Bei der Auswahl der durch eine nachhaltige Wärmepolitik zu fördernden bzw. durchzusetzenden Lösungen ist damit nicht nur wichtig, dass es sich um real verfügbare regenerative Energieformen handelt (vgl. Kapitel 2), sondern es kommt auch auf die heutigen und zukünftig zu erwartenden Kosten an. Mit Blick auf eine mögliche Verknappung von Biomasse ist z.B. mit zukünftig deutlich steigenden Preisen zu rechnen (Clausen, 2020b). Und mit Blick auf die langsame und extrem teure Skalierung und einschlägige Abschätzungen der zukünftigen Preisentwicklung kann auch bei Gas aus Power-to-Gas bis Mitte des Jahrhunderts mit sehr hohen Preisen im Vergleich zu anderer Wärmeformen gerechnet werden (Clausen, 2020b).

Wichtig für die Kosten der zukünftigen Wärmeversorgung ist aber auch die **Strommarktregulierung**. So lange Haushaltsstrom für Wärmepumpen wie auch Strom für den Betrieb kommerzieller Wärmepumpen in Wärmenetzen über die EEG-Umlage als Kostenträger für die Finanzierung der Transformation der Stromversorgung genutzt wird, ist das Heizen mit Wärmepumpen als zentraler Bestandteil der vorgeblich politisch gewünschten Sektorkopplung teuer und wird sich nur langsam durchsetzen. Während sich also in schwedischen Wärmenetzen Wärmepumpen bei Strompreisen um die 5 Cent/kWh durchsetzen, um Abwärme z.B. aus Rechenzentren in die Wärmenetze einzuspeisen, sind solche Lösungen in Deutschland bei Strompreisen von 15 Cent/kWh bislang chronisch unrentabel (Hintemann & Clausen, 2018).

Mit Fokus auf eine wärmepolitische Innovationspolitik ist darauf hinzuweisen, dass mit Blick auf die zahlreichen in der ersten Diffusionsphase befindlichen Technologien besonders **Folgeinnovationen zur Senkung der Kosten und zur Erhöhung der Anwenderfreundlichkeit** gefördert werden sollten. Das niederländische Konzept des seriellen Sanierens ist ein Beispiel dafür, wie Produktionskosten einer Schlüsseltechnologie der nachhaltigen Wärmeversorgung planmäßig reduziert werden.

**Abbildung 3: Bisherige und bis 2025 erwartete Kostensenkungen des seriellen Sanierens**



Quelle: Green Alliance (2019, S. 15)

Eine weitere wärmepolitische Maßnahme zur Kostenbegrenzung ist die **Verpflichtung der Kommunen zur Wärmeplanung** nach dem Vorbild von Dänemark, wie sie im Hamburgischen Klimaschutzgesetz schon durch ein Bundesland kodifiziert wurde (Hansestadt Hamburg, 2020). Durch Optimierung der Planung der Wärmeversorgung mit dem Ziel niedriger sozioökonomischer Kosten erreichte Dänemark bis heute einen Anteil von ca. 60% regenerativer Wärme bei Wärmekosten, die nicht wesentlich höher liegen als in Deutschland (Clausen & Beucker, 2019a). Zentrales Instrument hierzu ist der in Deutschland unbeliebte Anschlusszwang an das Wärmenetz, dessen Versorgungsdichte und Effizienz so gesteigert wird. Da Wärmenetze eine Art „natürliches Monopol“ sind, da Wärme nicht transportiert werden kann, wird auch eine öffentlich-rechtliche Überwachung der Wärmepreise nach dem Vorbild der Bundesnetzagentur erforderlich werden. Werden wärmepolitische Planungen auf bezahlbare Kosten hin optimiert, steigt auch die politische Durchsetzbarkeit. Die Diffusion der nachhaltigen Produkte und Lösungen kann dann durch Förderungen bzw. die Internalisierung externer Kosten weiter beschleunigt werden. Parallel dazu kann durch ordnungsrechtliche Regelungen, z.B. im Genehmigungsrecht, die Verbreitung der nachhaltigen Lösung begleitet und durch gezielte Verbote die Exnovation nicht-nachhaltiger Lösungen in Gang gesetzt werden. Die Diffusion der alternativen Lösung in den Massenmarkt ist dabei untrennbar damit verbunden, das Verschwinden der etablierten, aber nicht nachhaltigen Lösung aus dem Massenmarkt (Exnovation) zu organisieren.

## 6 Quellen

- AG Energiebilanzen. (2020). *Energieverbrauch in Deutschland Daten für das 1. Quartal 2020*. Münster. Zugriff am 13.6.2020. Verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/20-0-Berichte.html>
- AGFW e.V. (2019). *AGFW Hauptbericht 2018*. Frankfurt am Main. Zugriff am 31.12.2019. Verfügbar unter:  
[https://www.agfw.de/index.php?eID=tx\\_securedownloads&p=436&u=0&g=0&t=1577871387&hash=43e208f56b7aa4836a6dfcbb04526be036d07502&file=fileadmin/user\\_upload/Zahlen\\_und\\_Statistiken/Version\\_1\\_HB2018.pdf](https://www.agfw.de/index.php?eID=tx_securedownloads&p=436&u=0&g=0&t=1577871387&hash=43e208f56b7aa4836a6dfcbb04526be036d07502&file=fileadmin/user_upload/Zahlen_und_Statistiken/Version_1_HB2018.pdf)
- AGFW e.V., Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE), Verband kommunaler Unternehmen & Bundesverband Geothermie. (2019). *Voraussetzungen für eine Beschleunigung der Wärmewende und effizienten Klimaschutz durch die Nutzung von Geothermie in Fernwärmenetzen*. Zugriff am 12.1.2020. Verfügbar unter:  
[https://www.vku.de/fileadmin/user\\_upload/Verbandsseite/Landingpages/Geothermie/Impulspapier\\_Geothermie\\_AGFV\\_VKU\\_BEE\\_BVG.pdf](https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Landingpages/Geothermie/Impulspapier_Geothermie_AGFV_VKU_BEE_BVG.pdf)
- BSW Solar. (2020). *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie)*. Berlin. Zugriff am 13.6.2020. Verfügbar unter:  
[https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2020/04/bsw\\_faktenblatt\\_solarthermie.pdf](https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2020/04/bsw_faktenblatt_solarthermie.pdf)
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). (2019). *BGR Energiestudie 2018. Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversorgung*. Hannover. Zugriff am 8.1.2020. Verfügbar unter:  
[https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie\\_2018.pdf;jsessionid=264767B40076EA7B3FCDC93F32D390AC.2\\_cid284?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2018.pdf;jsessionid=264767B40076EA7B3FCDC93F32D390AC.2_cid284?__blob=publicationFile&v=10)
- Bundesministerium für Umwelt. (2011). *Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Zugriff am 19.4.2016. Verfügbar unter: [http://www.renewable-energy-concepts.com/fileadmin/user\\_upload/download-infos/broschuere\\_ee\\_zahlen\\_2011.pdf](http://www.renewable-energy-concepts.com/fileadmin/user_upload/download-infos/broschuere_ee_zahlen_2011.pdf)
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2020). *Nationale Wasserstoffstrategie*. Berlin. Zugriff am 13.6.2020. Verfügbar unter:  
[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=14](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=14)
- Bundesnetzagentur. (2019a). *Wie setzt sich der Gaspreis zusammen?* Zugriff am 10.1.2020. Verfügbar unter:  
<https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/PreiseUndRechnungen/WieSetztSichDerGaspreisZusammen.html>
- Bundesnetzagentur. (2019b). *Monitoringbericht 2018*. Bonn. Zugriff am 1.8.2019. Verfügbar unter:  
[https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2018/Monitoringbericht\\_Energie2018.pdf;jsessionid=6B45618A1EB2E10E70BE2FC4F7B3101D?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2018/Monitoringbericht_Energie2018.pdf;jsessionid=6B45618A1EB2E10E70BE2FC4F7B3101D?__blob=publicationFile&v=6)
- Chittum, A. & Østergaard, P. A. (2014). How Danish communal heat planning empowers municipalities and benefits individual consumers. *Energy Policy*, 74, 465–474.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.001>

- Clausen, J. (2019). *Industrie 4.0 im Kontext von Umweltinnovationen*. CliDiTrans Werkstattbericht 3-4. Berlin: Borderstep Institut. Zugriff am 20.11.2019. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/09/IndustrieVierNull-CliDiTrans20190912.pdf>
- Clausen, J. (2020a). *Transformation der Wärmeversorgung. Politisches Instrumentarium und Wachstumspotenziale*. Berlin.
- Clausen, J. (2020b). *Regenerative Wärmequellen. Wärmepotentiale zur Versorgung der Landeshauptstadt Hannover*. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J. & Beucker, S. (2019a). *Verbreitung radikaler Systeminnovationen. Fallbeispiel Wärmeversorgung Dänemark*. Berlin: Borderstep Institut. Zugriff am 20.6.2019. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/06/W%C3%A4rmeversorgung-Daenemark-Go-19-6-2019.pdf>
- Clausen, J. & Beucker, S. (2019b). *Verbreitung radikaler Systeminnovationen. Fallbeispiel Wärmeversorgung Schweden*. Berlin.
- Clausen, J. & Beucker, S. (2020). *Verbreitung radikaler Umweltinnovationen: Fallbeispiel Gebäudeenergiegesetz*. Berlin.
- Clausen, J. & Fichter, K. (2020). *Governance radikaler Systemtransformationen. Wirkung politischer Strategien und Instrumente in der Transformation großer Versorgungssysteme*. Berlin: Borderstep Institut.
- Danish Energy Authority. (2005). *Heat Supply in Denmark. Who What Where and - Why*. Kopenhagen. Zugriff am 24.4.2019. Verfügbar unter: [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/DEA\\_Heat\\_supply\\_in\\_denmark.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/DEA_Heat_supply_in_denmark.pdf)
- Dena. (2018). *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH. Zugriff am 16.8.2019. Verfügbar unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_lang.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf)
- DLR, Fraunhofer IWES & IfnE. (2011). *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010“*. Stuttgart. Zugriff am 2.3.2016. Verfügbar unter: [http://www.fvee.de/fileadmin/politik/bmu\\_leitstudie2010.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/politik/bmu_leitstudie2010.pdf)
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2019). *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2019*. Gützw. Zugriff am 14.6.2020. Verfügbar unter: [https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/basisdaten\\_bioenergie\\_2019\\_web.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/basisdaten_bioenergie_2019_web.pdf)
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (2020). *Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland*. Gützw. Zugriff am 14.6.2020. Verfügbar unter: <https://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22004416.pdf>
- Forum Energii, Agora Energiewende & DBDH. (2018). *Good heating practices from Denmark and Germany. Conclusions for Poland*. Warschau. Zugriff am 25.4.2019. Verfügbar unter: [https://www.agora-energien.de.de/fileadmin2/Partnerpublikationen/2018/Forum\\_Energii\\_Good\\_heating\\_practices\\_from\\_Denmark\\_and\\_Germany/Good\\_heating\\_practices\\_en\\_final.pdf](https://www.agora-energien.de.de/fileadmin2/Partnerpublikationen/2018/Forum_Energii_Good_heating_practices_from_Denmark_and_Germany/Good_heating_practices_en_final.pdf)



- Frey, J. (2018, 12.6). Dronninglund Fjernvarme. Gehalten auf der Deutsch-Dänischer Dialog Wärmenetze, Stuttgart. Zugriff am 25.4.2019. Verfügbar unter: [https://www.energiekompetenz-bw.de/energiekompetenz-bw/veranstaltungen/rueckblick/detail/?tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=523&cHash=3375a14e27c607cde0f95b25db67b963](https://www.energiekompetenz-bw.de/energiekompetenz-bw/veranstaltungen/rueckblick/detail/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=523&cHash=3375a14e27c607cde0f95b25db67b963)
- Green Alliance. (2019). *Reinventing retrofit. How to scale up home energy efficiency in the UK*. London. Zugriff am 17.4.2019. Verfügbar unter: [https://www.green-alliance.org.uk/reinventing\\_retrofit.php](https://www.green-alliance.org.uk/reinventing_retrofit.php)
- Grote, L., Hoffmann, P. & Tänzer, G. (2015). *Abwärmenutzung - Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge*. Saarbrücken: Institut für ZukunftsEnergieSysteme (IZES). Zugriff am 4.3.2016. Verfügbar unter: [http://www.izes.de/cms/upload/publikationen/20150901\\_BMUB\\_Studie\\_Abwaerme\\_V.1.1.pdf](http://www.izes.de/cms/upload/publikationen/20150901_BMUB_Studie_Abwaerme_V.1.1.pdf)
- Hansestadt Hamburg. (2020, Februar 20). *Hamburgisches Gesetz zum Schutz des Klimas (Hamburgisches Klimaschutzgesetz - HmbKliSchG)*. Zugriff am 6.3.2020. Verfügbar unter: <http://www.landesrecht-hamburg.de/jportal/portal/page/bshaprod.psml?showdoccase=1&st=null&doc.id=jlr-KlimaSchGHA2020rahmen&doc.part=X&doc.origin=bs>
- Hintemann, R. & Clausen, J. (2018). *Bedeutung digitaler Infrastrukturen in Deutschland. Sozioökonomische Chancen und Herausforderungen für Rechenzentren im internationalen Wettbewerb. Berlin*. Verfügbar unter: Berlin. Zugriff am 14.6.2018. Verfügbar unter: [https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/2018/06/DI\\_Studie.pdf](https://www.eco.de/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/06/DI_Studie.pdf)
- Koch, M. (2020, Juni 11). Schöne neue Welt des Wasserstoffs. *Hannoversche Allgemeine Zeitung*, S. 2–3.
- Lechtenböhrer, S., Samadi, Sa., Leipprand, A. & Schneider, C. (2019). Grüner Wasserstoff, das dritte Standbein der Energiewende? *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69(10), 10–13.
- Leibnizinstitut für angewandte Geophysik. (2018). *Positionspapier: Die Rolle der tiefen Geothermie bei der Wärmewende. Wie Deutschland 60 % erneuerbare Wärme bis 2050 schaffen könnte*. Hannover. Zugriff am 31.1.2020. Verfügbar unter: [https://www.leibniz-liag.de/fileadmin/user\\_upload/s4/downloads/positionspapier\\_waermewende.pdf](https://www.leibniz-liag.de/fileadmin/user_upload/s4/downloads/positionspapier_waermewende.pdf)
- Märtel, C. (2020). Photovoltaik Freilandanlage - Freiflächenanlage. *Solaranlagen Portal*. Zugriff am 12.6.2020. Verfügbar unter: <https://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/freilandanlage>
- Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW GmbH. (2018). *Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme*. Berlin. Zugriff am 15.1.2020. Verfügbar unter: [https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/indwede-studie\\_v04.1.pdf](https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/indwede-studie_v04.1.pdf)
- Ökolandbau.de. (2020, Januar 15). Agrophotovoltaik: Acker und Solarenergie optimal kombinieren. Zugriff am 13.7.2020. Verfügbar unter: <https://www.oekolandbau.de/landwirtschaft/betrieb/oekonomie/diversifizierung/agrophotovoltaik-acker-und-solarenergie-optimal-kombinieren/>
- Pehnt, M. & Bödecker, J. (2010). *Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Bericht im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaft-*

- liche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative*". Karlsruhe und Heidelberg: ifeu, Fraunhofer ISI & IREES. Zugriff am 30.7.2019. Verfügbar unter: [https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Nutzung\\_industrieller\\_Abwaerme.pdf](https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Nutzung_industrieller_Abwaerme.pdf)
- Perner, J., Unteutsch, M. & Lövenich, A. (2018). *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe*. Köln. Zugriff am 10.1.2020. Verfügbar unter: [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost\\_2050/Agora\\_SynCost-Studie\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf)
- Plenz, M. (2016). *Potenzialanalyse Überschussstrom für Power-to-Heat und Power-to-Gas*. Senftenberg. Zugriff am 29.12.2019. Verfügbar unter: [https://www.gebaeude-energien.de.de/data/gebEner/user\\_upload/Bilder/Dateien/GEW\\_Arbeitspapier\\_5\\_\\_Nutzung\\_%C3%9Cberschussstrom\\_Plenz.pdf](https://www.gebaeude-energien.de.de/data/gebEner/user_upload/Bilder/Dateien/GEW_Arbeitspapier_5__Nutzung_%C3%9Cberschussstrom_Plenz.pdf)
- Projekt APV-RESOLA. (2020). Politische Rahmenbedingungen. Zugriff am 13.7.2020. Verfügbar unter: <https://www.agrophotovoltaik.de/weiterführende-informationen/politische-rahmenbedingungen/>
- Schill, W.-P. (2014, Dezember 11). Entwicklung der Residuallast und hypothetischer Speicherbedarf für Überschüsse. Gehalten auf der Abschlussworkshop des Forschungsprojekts StoRES, Berlin. Zugriff am 29.11.2019. Verfügbar unter: [https://www.diw.de/documents/vortragsdokumente/220/diw\\_01.c.493075.de/v\\_2014\\_schill\\_ueberschuesse\\_stores7.pdf](https://www.diw.de/documents/vortragsdokumente/220/diw_01.c.493075.de/v_2014_schill_ueberschuesse_stores7.pdf)
- Sköldberg, H. & Rydén, B. (2014). *The heating market in Sweden - an overall view*. Lund und Halmstad. Zugriff am 26.6.2019. Verfügbar unter: [http://www.varmemarknad.se/pdf/The\\_heating\\_market\\_in\\_Sweden\\_141030.pdf](http://www.varmemarknad.se/pdf/The_heating_market_in_Sweden_141030.pdf)
- Statistisches Bundesamt. (2018). *Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969 - 2018*. Wiesbaden. Zugriff am 1.1.2020. Verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publicationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publicationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.pdf?__blob=publicationFile)
- Umweltbundesamt. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE - Studie*. Dessau-Roßlau. Zugriff am 30.12.2019. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue\\_studie\\_cc\\_36-2019\\_wege\\_in\\_eine\\_ressourcenschonende\\_treibhausgasneutralitaet.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf)