

DEKARBONISIERUNG DER PROZESSWÄRMEVERSORGUNG

Explorative Studie zur Entwicklung einer Pfadwechselkonzeption für die Dekarbonisierung der Prozesswärmeversorgung

Jens Clausen



IMPRESSUM

AUTORINNEN UND AUTOREN

Jens Clausen (Borderstep Institut)

M clausen@borderstep.de

VERLAG

© Borderstep Institut März 2024

PROJEKTDURCHFÜHRUNG

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH

Dr. Jens Clausen

Clayallee 323 | 14169 Berlin | +49 (0)179 928 51 71

www.borderstep.de

ZITIERVORSCHLAG

Clausen, J. (2024). Explorative Studie zur Entwicklung einer Pfadwechselkonzeption für die Dekarbonisierung der Prozesswärmeversorgung. Berlin: Borderstep Institut.

TITELBILD

© Ichudov, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons

AUFTRAGGEBER

Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) an der Leibniz Universität Hannover

INHALTSVERZEICHNIS

Impressum.....	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	V
1 Einführung	1
2 Zielsetzung des Vorhabens und Methode	2
2.1 Zielsetzung.....	2
2.2 Methode.....	2
3 Rahmenkonzept der Politikinstrumente der Transformation.....	2
4 Ansätze der politischen Gestaltung des Übergangs der Industrie zur Klimaneutralität ...	4
4.1 Richtungssicherheit der Transformation.....	4
4.1.1 Politische Zielsetzungen und Prioritäten der Transformation	4
4.1.2 Rahmenbedingungen der Transformation.....	7
4.1.3 Fazit Richtungssicherheit	8
4.2 Infrastrukturpolitik	9
4.2.1 Wasserstoff	9
4.2.2 Stromversorgung.....	10
4.2.3 Verfügbarkeit von Biomasse	12
4.2.4 Carbon Capture and Storage.....	12
4.2.5 Fazit Infrastrukturpolitik.....	12
4.3 Synchronisation von Diffusion und Exnovation.....	13
4.4 Zwischenfazit	14
5 Innovationspolitik, Nischenbildung und Skalierung des Angebots im Bereich der Elektrowärme	15
5.1 Der Stand der Elektrifizierungstechnologien.....	15
5.2 Innovationspolitik.....	16
5.3 Umstellung der Prozesswärmeerzeugung auf neue Energieformen	17
5.3.1 Genehmigungsfristen	18
5.3.2 Fachkräfte.....	19
5.3.3 Clusterförderung	19
6 Handlungsempfehlungen.....	20

Quellen..... 22

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Idealtypischer Einsatz von Basisstrategien der Transformation großer Versorgungs- und Produktnutzungssysteme	3
Abbildung 2: Endenergieträger im Bereich industrielle Prozesswärme in Deutschland.....	8
Abbildung 3: In Niedersachsen geplante Wasserstoff-Infrastrukturen und -Projekte	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Netzknoten im Übertragungsnetz Niedersachsens	11
Abbildung 5: Ökonomische Attraktivität und Diffusion im Bestand verschiedener Elektrowärmetechnologien	17

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Schlüsseltechnologien zur Dekarbonisierung der Prozesswärme	5
--	---

1 Einführung

In der Industrie ging der Endenergieverbrauch ab dem Jahr 1990 zunächst bis 1995 um ca. 15 % zurück. Dies ist hauptsächlich auf den Schwund der Industrie in den neuen Bundesländern zwischen 1990 und 1993 zurückzuführen. Ab dem Jahr 2002 stieg der Energieverbrauch mit dem Wachstum der Wirtschaft wieder ein wenig an. In den letzten Jahren bremsen Fortschritte bei der Energieeffizienz die Verbrauchsentwicklung trotz steigender wirtschaftlicher Konjunktur. Etwa zwei Drittel des Endenergieverbrauchs der Industrie wird für Prozesswärme benötigt. Mechanische Energie zum Beispiel zum Betrieb von Motoren oder Maschinen sorgt für circa ein Viertel des Verbrauchs, Raumwärme hat nur einen kleinen Anteil. Der überwiegende Teil sämtlicher in der Industrie eingesetzten Energie basiert auf fossilen Energieträgern (Umweltbundesamt, 2022b).

Zur Dekarbonisierung dieser großen Menge an Energie bleiben mit Blick auf die Zielstellung der Klimaneutralität in 2045 (Die Bundesregierung, 2021) noch etwas mehr als 20 Jahre. Die rasche und wirksame Diffusion verfügbarer Technologien der Dekarbonisierung sowie parallel dazu die Entwicklung weiterer Technologien ist damit von höchster Dringlichkeit.

Im Sektor der Industrie wurde durch die Klima- und Industriepolitik dabei bisher nicht viel erreicht. Åhman, Nilsson, & Johansson (2017, S. 346) bemerken, dass die umgesetzten Maßnahmen vor allem die Energieeffizienz und geringfügige Emissionsenkungen gefördert, aber gleichzeitig die energieintensiven Sektoren durch Ausnahmeregelungen und Ausgleichsregelungen vor höheren Energie- und Kohlenstoffkosten geschützt und so weitere Fortschritte eher verhindert haben. Weiter weisen sie darauf hin, dass internationale Wettbewerbsfragen eine für die Politik hohe Bedeutung haben und insoweit Instrumente erforderlich sind, die sich nicht nachteilig auf einzelne Akteure auswirken.

Die Transformationsstudie zur Dekarbonisierung der niedersächsischen Wirtschaft fasst wesentliche Hemmnisse zusammen (Mohnen, Thmasen, Weiß, Ingwersen, & Gulden, 2022):

„Als Hemmnisse für die Umstellung der industriellen Wärmeprozesse werden unter anderem die fehlende Verfügbarkeit von bezahlbarem Strom und erneuerbaren Brennstoffen, eine fehlende Planungssicherheit, die fehlende Wirtschaftlichkeit – sowohl durch hohe Anfangsinvestitionen als auch hohe laufende Kosten im Vergleich zur fossilen Alternative – sowie hohe Refinanzierungskosten, lange Genehmigungsverfahren und aufwändige Förderantragsverfahren aufgeführt.

Ein weiteres Hindernis ist die technische Verfügbarkeit. Insbesondere für höhere Temperaturbedarfe sind die entscheidenden Technologien häufig noch in der Entwicklungs-, Pilot- oder Erprobungsphase. Auch die prozessspezifische Anwendung verfügbarer Querschnittstechnologien wie industrieller Wärmepumpen muss vielfach noch erprobt werden. Zudem fehlt es bislang an Infrastruktur zur Wärmeverteilung sowie ausreichenden Stromnetzanschlusskapazitäten.“

Die Entwicklung einer Pfadwechselkonzeption für die Dekarbonisierung der Prozesswärmeversorgung ist insoweit eine herausfordernde Aufgabe.

2 Zielsetzung des Vorhabens und Methode

2.1 Zielsetzung

Ziel der Studie ist es, Überblick über mögliche politische Instrumente zu schaffen, mit denen die Transformation der Prozesswärmeversorgung der Industrie hin zur Klimaneutralität effektiviert und beschleunigt werden kann. Dabei sind sowohl die Herstellung von Richtungssicherheit, die Innovationspolitik und das Nischenmanagement als auch die nötige Veränderung von Energieinfrastrukturen, die Diffusion klimafreundlicher Technologien und die Exnovation fossiler Energieversorgungssysteme im Auge zu behalten. Fokussiert wird auf die Frage, wie im Falle eines erfolgreichen Anlaufens der Transformation sichergestellt werden kann, dass die Ausrüster-Branche (Anlagenbau) sowie die auf Anlagenplanung für Wärmeanwendungen spezialisierten Ingenieurbüros so schnell und weitgehend wie möglich klimaverträgliche Technologien liefern können.

2.2 Methode

Um diese Ziele zu erreichen, wird folgendes Untersuchungsdesign gewählt:

- (1) **Desk Research:** Durchführung einer Literaturrecherche und Zusammenfassung der vorhandenen Informationen mit dem Fokus auf politische Instrumente zur Transformation der Prozesswärmeversorgung der Industrie hin zur Klimaneutralität.
- (2) **Expertengespräche und Online-Workshop:** Durchführung einer Reihe von Expertengesprächen zu ausgewählten Fragestellungen der Transformation der Prozesswärmeversorgung der Industrie hin zur Klimaneutralität mit Fokus auf die Branche des Anlagenbaus.

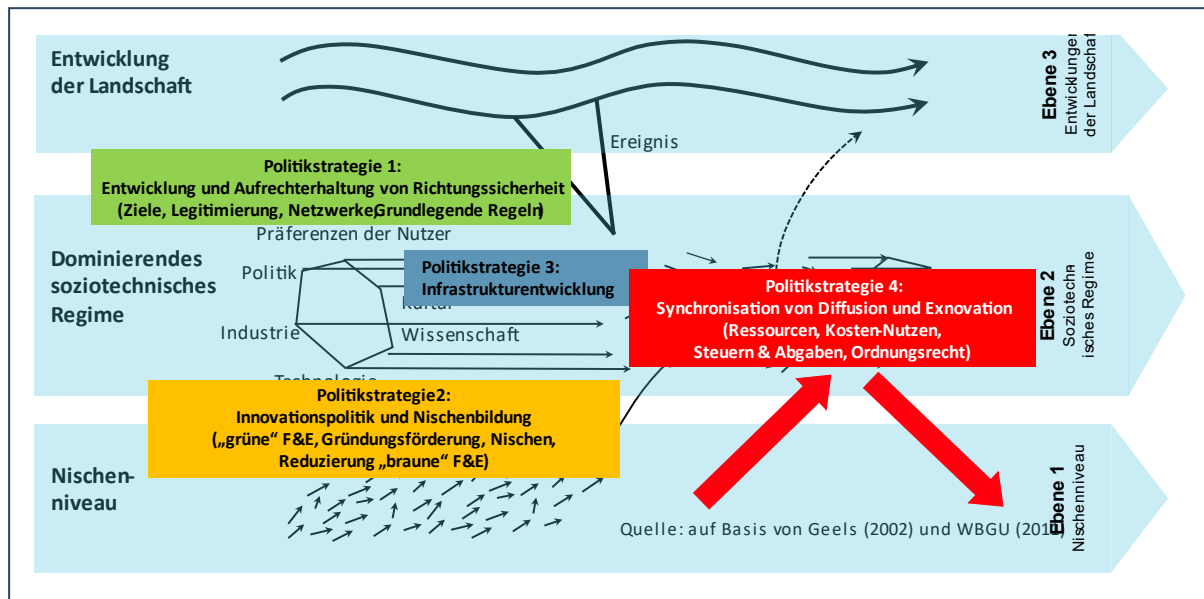
Für Überlegungen zu Infrastrukturen in Kapitel 4.2 wird Niedersachsen beispielhaft herangezogen.

3 Rahmenkonzept der Politikinstrumente der Transformation

Das von Kivimaa & Kern (2016) entwickelte Konzept zur Untersuchung von Politikinstrumenten und Policy Mixes in Transformationsprozessen wurde von Clausen und Fichter (2020) für die Untersuchung der Governance radikaler Systemtransformationen in der Raumwärmeversorgung erweitert und angepasst. Die Klassifikationsrahmen von Politikinstrumententypen hat sich in der Analyse der von Clausen und Fichter untersuchten sieben Transformationsfälle grundsätzlich bewährt und soll auch dieser Arbeit zu Grunde gelegt werden.

Die empirische Untersuchung von Erfolgsfällen radikaler Systemtransformationen (Clausen & Fichter, 2020) lässt vier Grundmuster oder Basisstrategien erkennen, von denen angenommen werden kann, dass sie für die erfolgreiche Steuerung des grundlegenden Wandels großer Versorgungs- und Produktnutzungssysteme von wesentlicher Bedeutung sind. Die im Folgenden dargestellte Abbildung 1 zeigt die Basisstrategien.

Abbildung 1: Idealtypischer Einsatz von Basisstrategien der Transformation großer Versorgungs- und Produktnutzungssysteme



Quelle: Borderstep vor dem Hintergrund des Mehrebenenmodells (Geels, 2002)

Die Darstellung basiert auf dem Mehrebenenmodell von Geels (2002), welches die gesellschaftliche und politische „Landschaft“, das „dominierende soziotechnische System“ sowie die „Nischen“ unterscheidet, in denen Innovationen oft entstehen und sich erste Märkte entwickeln.

Ausgangspunkt ist immer ein politisches Ziel der Transformation, das Grundlage für die **Entwicklung und Aufrechterhaltung von Richtungssicherheit** ist (Politikstrategie 1). Über Ziele sollte Einigkeit herrschen und sie sollten gesellschaftlich legitimiert sein. Die Bildung von Richtungssicherheit kann in der frühen Phase der Transformation durch diagnostisches Framing dadurch behindert werden, dass die Notwendigkeit einer Veränderung ganz generell in Frage gestellt wird. Auch kann durch prognostisches Framing die Richtung der Veränderung in Frage gestellt, Verwirrung gestiftet und der Transformationsprozess so verzögert werden (Geels, 2014).

Ist die technische Grundlage einer Transformation nicht gegeben, muss von der Gesellschaft durch **Forschung und Entwicklung**, die Förderung von Gründungen und Entrepreneurship sowie den **Aufbau von Nischenmärkten** die Verfügbarkeit einer funktionalen, kostengünstigen und skalierbaren Alternative geschaffen werden (Politikstrategie 2). So waren z.B. in den 1970er und 1980er Jahren verlässliche Technologien zur Gewinnung erneuerbarer Energie wie auch Automobile mit alternativen Antrieben schlicht nicht existent (Clausen, 2018, 2019; Clausen & Warnecke, 2019). Die Förderung von Forschung und Entwicklung wie auch sogenannte Marktanreizprogramme zielten in dieser Zeit darauf, genau dies zu ändern.

In der zentralen Phase der Transformation stehen starke Instrumente im Vordergrund der Politik, die durch hohe Förderungen bzw. die Internalisierung externer Kosten die Wirtschaftlichkeit der besseren Alternative herstellen sowie parallel dazu durch ordnungsrechtliche Regelungen, z.B. im Genehmigungsrecht, die Verbreitung der alternativen Lösung begleiten und durch wirtschaftliche Benachteiligung, z.B. die CO₂-Abgabe oder gar gezielte Verbote, die Exnovation in Gang setzen. Die Diffusion der alternativen Lösung in den Massenmarkt ist untrennbar damit verbunden, das Verschwinden der etablierten, aber nicht nachhaltigen Lösung aus dem Massenmarkt (Exnovation) zu organisieren und

für eine **Synchronisation von Diffusion und Exnovation** zu sorgen (Politik 3). Implizit ist von Bedeutung, in die „heiße Phase“ der Transformation mit den Instrumenten der ordnungsrechtlichen und ökonomischen Steuerung dann einzutreten, wenn sich durch externe Ereignisse hierfür ein politisches Window of Opportunity öffnet (Kahlenborn, Clausen, Behrendt, & Göll, 2019).

Wie die Fallstudien von Clausen und Fichter (2020) gezeigt haben, kommt es bei radikalen 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 sogar erst geschaffen werden (Politikstrategie 4).

4 Ansätze der politischen Gestaltung des Übergangs der Industrie zur Klimaneutralität

4.1 Richtungssicherheit der Transformation

4.1.1 Politische Zielsetzungen und Prioritäten der Transformation

Das Energiewirtschaftsgesetz (Die Bundesregierung, 2022) legt in § 1 Zweck und Ziele des Gesetzes wie folgt fest:

„Zweck des Gesetzes ist eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente, umweltverträgliche und treibhausgasneutrale leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität, Gas und Wasserstoff, die zunehmend auf erneuerbaren Energien beruht.“

Für die Beurteilung von erneuerbaren Energien, die fossile Energien zur Versorgung der Industrie mit Prozesswärme ersetzen können, ergeben sich daraus eine Reihe von Anforderungen:

- ▶ Die Versorgung mit neuen Energieformen muss sicher sein, d.h. die vorhandenen Potenziale solcher Energien müssen hinreichend groß sein, um die zu erwartenden Bedarfe an industrieller Prozesswärme dauerhaft zu decken.
- ▶ Die neuen Energieformen sollten eine effiziente Deckung des Prozesswärmebedarfs bei langfristig (über mehrere Jahrzehnte) zu erwartenden stabilen und bezahlbaren Preisen ermöglichen.
- ▶ Die neuen Energieformen müssen umweltverträglich und treibhausgasneutral sein und aus erneuerbaren Quellen stammen.

Als neue Energieformen zur Substitution des bisher größtenteils fossil gedeckten Prozesswärmebedarfs werden in erster Linie elektrischer Strom, verschiedene Formen von fester, flüssiger und gasförmiger Bioenergie sowie der sekundäre Energieträger Wasserstoff und seine Folgeprodukte diskutiert. Als weitere Alternative ist die Nutzung fossiler Energien in Kombination mit CCS (Carbon Capture and Storage) im Gespräch. Auch die Solarthermie wird immer wieder von einschlägigen Akteuren ins Gespräch gebracht und die Zahl der realisierten Anlagen nimmt gegenwärtig zu (Lütten, 2022). Diese fünf Energieformen lassen sich mit Blick auf die oben genannten drei Kriterien der Energieversorgung wie folgt charakterisieren:

Tabelle 1: Schlüsseltechnologien zur Dekarbonisierung der Prozesswärme

Schlüssel-technologien	Versorgungssicherheit	Umweltverträglichkeit	Preisgünstigkeit
Erneuerbarer elektrischer Strom	Insbesondere PV lässt sich fast unbegrenzt ausbauen, auch die Potenziale an Windenergie sind groß und lassen eine Versorgung mit 100 % erneuerbarem Strom zu (Göke, Kemfert, Claudia, Kendzierski, & von Hirschhausen, 2021).	Strom aus Wind und Sonnenenergie ist so weit wie gegenwärtig möglich umwelt- und klimaverträglich.	Mit langfristig bis in die 2030er Jahre sinkenden Gestehungskosten sowohl für Strom aus Wind wie aus Photovoltaik wird gegenwärtig gerechnet (Fraunhofer ISE, 2018).
Feste, flüssige und gasförmige Bioenergie	Aufgrund sinkender Produktivität der Natur aufgrund des Klimawandels könnte die Verfügbarkeit von Bioenergie weltweit abnehmen (Scientists for Future, 2022). Versorgungsengpässe sind im Sommer 2022 sowohl bei Holz wie bei Pellets bereits zu beobachten (a.a.O.). Von der Ausweitung der Nutzung von Biomasse wird daher abgeraten (Umweltbundesamt, 2019)	Bioenergie ist in vielen Fällen nicht treibhausgasneutral. So ist z.B. die Produktion von Anbaubiomasse mit hohen CO ₂ -Emissionen verbunden. Ebenso wird Holz aus nicht nachhaltiger Forstwirtschaft als sehr klimaschädlich bewertet (Scientists for Future, 2022; Umweltbundesamt, 2019). Die Verbrennung von Biomasse aller Art erzeugt zudem lokal schädliche Emissionen.	Die Preisentwicklung für Bioenergie zeigt sich gegenwärtig volatil (Scientists for Future, 2022). „Langfristig führen Bevölkerungszunahme, steigender Fleischkonsum in Schwellenländern, Klimawandel und auch Bioenergie sehr wahrscheinlich zu Preissteigerungen bei Agrarrohstoffen“ (Umweltbundesamt, 2022a).
Wasserstoff als sekundärer Energieträger	Wasserstoff wird noch mehrere Jahrzehnte tendenziell knapp sein, da sowohl der Ausbau der notwendigen Erzeugung von grünem Strom wie auch der großskalige Ausbau der Elektrolyse Zeit in Anspruch nimmt (Hydrogen Council, 2021; IEA, 2021). Durch breite Nutzung für die Bereitstellung von Raumwärme (Rosenow, 2023, 2024) oder im Verkehr könnte diese Tendenz verstärkt werden. Die Verfügbarkeit von H ₂ ist damit mittelfristig unsicher (Mohnen et al., 2022).	Grüner Wasserstoff auf Basis von regenerativem Strom gilt als umwelt- und klimaverträglich. Zu beachten ist allerdings, dass elementarer Wasserstoff eine nicht unerhebliche Treibhauswirkung aufweist, die mehr als das elffache von CO ₂ beträgt (Warwick et al., 2022). Da die Herstellung von 1 kWh Wasserstoff ca. 1,4 kWh Strom erfordert, ist für die Herstellung der nötigen Stromerzeugungsanlagen deutlich mehr „graue“ Energie erforderlich als für die Direktstromnutzung.	Verschiedene Studien sagen hohe Gestehungskosten für Wasserstoff voraus (Witsch, 2023). Von ca. 19 bis 25 Cent/kWh ist die Rede (Hank et al., 2023), beim Fernimport aus z.B. Australien ermittelt die Boston Consulting Group aufgrund der hohen Transportkosten bis zu 24 Cent/kWh (Burchard et al., 2023). Der Preispfad dürfte aufgrund der Verluste bei der aufwendigen Herstellung dauerhaft nicht unter die Stromkosten absinken.
CCS	CCS ist keine serienreife und erprobte Technologie (Åhman et al., 2017; Zachmann et al., 2021, S. 56f). CCS könnte nur dann als sicherer Weg zur	CCS ist mit dem Risiko verbunden, dass CO ₂ entweicht. Geschwindigkeit und Folgen des Entweichens sind unklar. Falls man das CO ₂ weiterverarbeitet und als reaktionsträgen	CCS ist insbesondere dann teuer, wenn die Weiterverarbeitung von CO ₂ zu einem Feststoff erfolgt. Dieser weitere Prozessschritt erhöht den

Schlüssel-technologien	Versorgungssicherheit	Umweltverträglichkeit	Preisgünstigkeit
	Klimaneutralität gelten, wenn das CO ₂ zuverlässig über sehr lange Zeit dem Kreislauf entzogen wird. Dies wird zumindest noch bezweifelt (Breyer, Fasihi, & Aghahosseini, 2020)	Feststoff lagert, ließe sich das Risiko verkleinern (Breyer et al., 2020).	Kosten- und Energieaufwand.
Solarthermie	Während des Sommerhalbjahres hohe und im Winter niedrige Strahlungsintensität. Dadurch hohe Planbarkeit und auch hohe, wenn auch zeitlich begrenzte, Versorgungssicherheit.	Durch hohen Flächenertrag unter Einsatz einer vergleichsweise unaufwendigen Technologie (Low-Tech) sehr materialeffizient. Die Gewinnung von solarthermischer Wärme ist mit keinerlei Risiken für die Umwelt verbunden.	Jordan (2020) und Plan Energi (2018) geben die Energiekosten von solarthermischer Prozesswärme mit ca. 4,5 Cent/kWh an. Lütten (2022) stellt verschiedene realisierte und wirtschaftliche Projekte dar.

Quelle: Borderstep

Mit Blick auf die übergreifenden Ziele des EnWG ergibt sich durch die Abwägung der vier Schlüsseltechnologien und die jeweilige Eignung zur Erfüllung der energiepolitischen Ziele die Prioritätenreihenfolge:

- (1) Einsatz von **erneuerbarem Strom** oder **solarthermischer Wärme**, wenn dies nicht möglich ist
- (2) Einsatz von **Wasserstoff** aus erneuerbarem Strom und auch wenn dies auch nicht möglich ist
- (3) Einsatz von **Biomasse**.
- (4) Aus gegenwärtiger Sicht erscheint **CCS** noch keine planbare Option zu sein.

Die Tabelle macht deutlich, dass der Ansatz der Technologieoffenheit hier nicht angewendet werden kann. Der Einsatz von Strom ist im Vergleich zu Wasserstoff effizienter und macht Transport und Lagerung und damit auch Emissionen des klimaschädlichen Wasserstoffs überflüssig. Und während sich Anlagen zur Produktion regenerativen Stroms wie auch zur Elektrolyse planbar ausbauen lassen, ist die Verfügbarkeit von Biomasse zur Energieversorgung langfristig mehr als nur unsicher. CCS scheint, wenn man die kritische Literatur einbezieht, noch keine planbare Option zur sicheren Realisierung von Klimaneutralität zu sein.

Auch die Untersuchung von Richardson-Barlow, Pimm, Taylor, & Gale, (2022) zeigt am Beispiel der Stahlindustrie, dass die Stahlherstellung (sofern sie wie z.B. im Fall von Recyclingstahl möglich ist) durch Einsatz von Strom sowohl hinsichtlich der Treibhausgasemissionen wie auch der Kosten vorteilhafter ist als der Einsatz von Wasserstoff und dieser wiederum vorteilhafter als der Einsatz von fossilen Energien und CCS.

Am Beispiel von Niedersachsen führen Mohnen et al. (2022, S. 82f) ähnliche Prioritäten auf:

Die direkte Nutzung von Strom in der Erzeugung von Prozesswärme weist dabei einen deutlich höheren Effizienzgrad auf als eine indirekte Elektrifizierung durch synthetische Kraftstoffe oder den Einsatz von Wasserstoff. Folglich sollte insbesondere die Nutzung bestehender Potenziale für die Prozesselektrifizierung sowie die Entwicklung und Anwendungserprobung neuer Elektrifizierungstechnologien aktiv unterstützt werden. Ebenso ergibt sich aus der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse aus nachhaltigen Quellen die Notwendigkeit der Fokussierung ihres Einsatzes auf Anwendungsbereiche, in denen andere Technologien und Energiequellen nicht nutzbar sind. Ein nutzenoptimaler Einsatz verschiedener Energiequellen und -träger sollte folglich auch in den verfügbaren Förder- und Beratungsangeboten für Unternehmen unterstützt werden (bspw. basierend auf einem 4-Stufen-Model wie von IN4climate.NRW vorgeschlagen. Dieser Priorisierung zufolge sollte nur dann auf klimaneutrale Brennstoffe wie Biomasse oder Wasserstoff umgerüstet werden, wenn eine Nutzung von Abwärme oder erneuerbaren Wärmequellen sowie eine Elektrifizierung der Prozesse nicht möglich ist.

4.1.2 Rahmenbedingungen der Transformation

Zur Gestaltung des politischen Rahmens der Transformation ist zu beachten, dass die Umsetzung der Transformation selbst lange Zeiten benötigt. Sowohl die Zeiten zum Ausbau der regenerativen Stromversorgung wie auch die Zeiten zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft bemessen sich in Jahrzehnten, die zum Aufwachsen von Wäldern zur Gewinnung von Biomasse ebenfalls.

Parallel dazu führen lange Investitionszyklen von bis zu 40 Jahren und in Einzelfällen noch längeren Zeiten (Åhman et al., 2017, S. 638) zu hohen Ansprüchen an Versorgungssicherheit sowie an die Richtigkeit von langfristigen Kostenprognosen. Mit Blick auf die Notwendigkeit der Erreichung von Klimaneutralität um das Jahr 2045 herum stehen uns noch 21 Jahre für den Umbau fast der gesamten Industrie zur Verfügung. Damit entfällt die Zeit, Fehler zu machen und zu korrigieren. Jeder Um- oder Neubau einer energieintensiven Anlage muss sicher in die Klimaneutralität führen und dabei auf lange Zeit zur Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens beitragen. Auch kann nur auf Energieträger umgestellt werden, deren Verfügbarkeit über Jahrzehnte sichergestellt erscheint. Als einzige Alternative bietet sich die Möglichkeit, Anlagen vorwärtskompatibel zu errichten. So ist es z.B. denkbar, eine Produktionsanlage für den langfristigen Betrieb mit grünem Wasserstoff „Hydrogen Ready“ zu errichten, aber bis zum Eintreten der realen Verfügbarkeit von Wasserstoff mit Erdgas zu betreiben. Mit Blick auf die Elektrifizierung kann ähnlich geplant werden. Die Elektrifizierung einer Anlage ist auch in einem Stromversorgungssystem möglich, welches noch nicht mit 100 % grünem Strom versorgt wird. Die Klimaneutralität der Anlage tritt dann ohne weitere Änderungen an der Anlage dann ein, wenn die grüne Stromversorgung endgültig ausgebaut ist.

Weiter besteht bei der Wärmeversorgung die Notwendigkeit, die geografischen Standorte zu beachten. Denn die Potenziale zur Gewinnung von Wärme sind immer vom Standort abhängig. Bei der Prozesswärme dürfte das wichtigste Wärmepotenzial in der Abwärme anderer Prozesse oder anderer Fabrikationsstätten bestehen. Aber auch Umweltwärme kann von Bedeutung sein. So stehen z.B. am Alpennordrand geothermische Potenziale von über 140 °C zur Verfügung (Bundesverband Geothermie, 2022), deren Nutzung zur Prozesswärmeversorgung (bei geeigneten Temperaturen) gegenüber der Nutzung von Strom, Wasserstoff oder Biomasse deutlich vorzuziehen sein dürfte. Um den Aspekt der Gebundenheit an Standorte bei der Wärmeversorgung in Zukunft deutlicher zu machen, wird

gegenwärtig eine verpflichtende kommunale Wärmeplanung eingeführt, in die auch Unternehmen mit Wärmebedarf oder einer möglichen Abgabe von Abwärme eingebunden sein werden (Die Bundesregierung, 2023; Riechel & Walter, 2022). Durch unterschiedliche Standorte ergeben sich also u.U. besondere Transformationsoptionen. Eine Politik zur Transformation der Wärmeversorgung der Industrie muss also so gestaltet sein, dass Anpassungen an örtliche Chancen und Risiken möglich sind. Devine-Wright (2022) entwickelt aus soziologischer Sicht ebenfalls überzeugende Argumente für einen ortsbezogenen Ansatz.

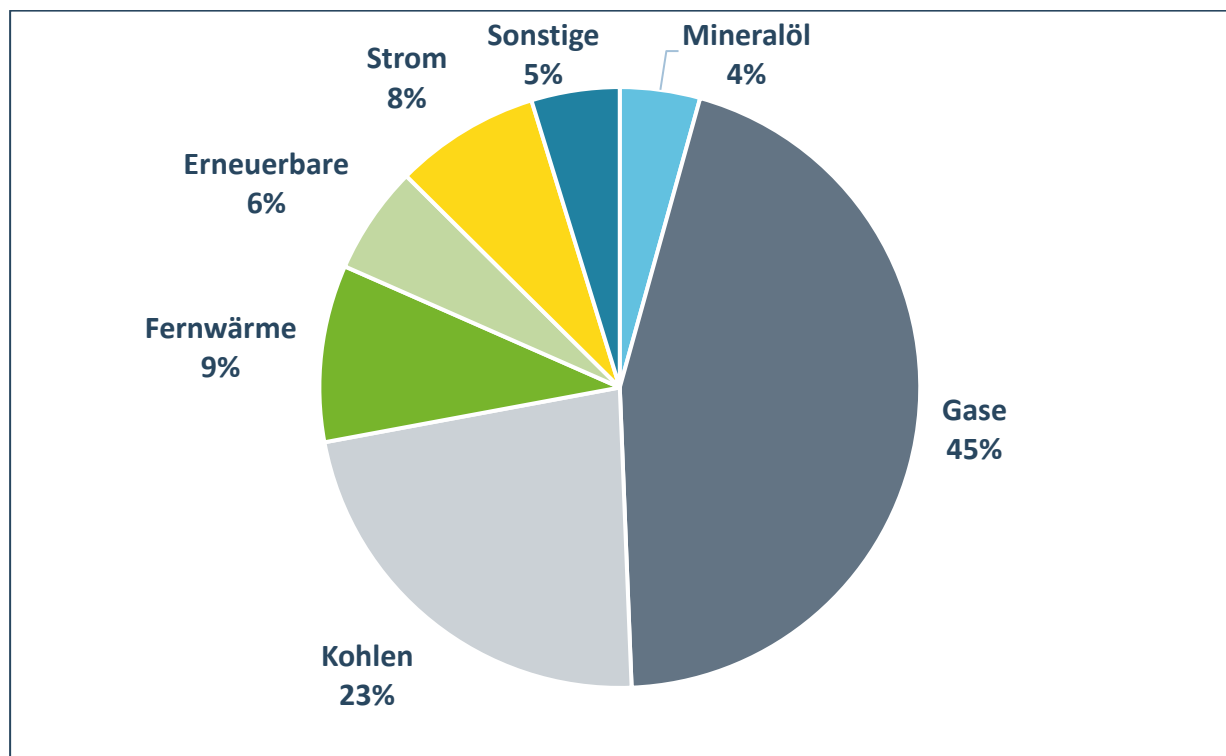
Wichtig ist auch, bei der Frage der Wärmeversorgung von Anlagen gleichzeitig auch an die mögliche Nutzung unvermeidbarer Abwärme zu denken. Diese Frage stellt sich besonders überall dort, wo technische Anlagen neu errichtet werden. Alle Anlagen, die Abwärme produzieren sollten an Orten errichtet werden, an denen diese Abwärme auch genutzt werden kann und so einen Beitrag zur Lösung des Problems der Wärmebeschaffung leisten.

4.1.3 Fazit Richtungssicherheit

Die komplexen Anforderungen an eine nachhaltige Energieversorgung, im Wesentlichen wiedergegeben durch das „energiepolitische Zieldreieck“ Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit, erfordern eine gleichermaßen komplexe Politik. Sogar über das Zieldreieck hinaus muss eine solche Politik weitere Forderungen erfüllen:

- ▶ Es müssen die zur Verteilung der Energie nötigen Infrastrukturen geschaffen werden.
- ▶ Es muss dafür gesorgt werden, dass der Wandel hinreichend schnell zur Erfüllung der Klimaziele erfolgen kann.

Abbildung 2: Endenergieträger im Bereich industrielle Prozesswärme in Deutschland



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2021)

Gehen wir davon aus, dass die anteilige Bedeutung der Energieträger zumindest grob die anteilige Zahl der Anlagen widerspiegelt, in denen diese zur Erzeugung von Prozesswärme genutzt werden, dann müssen in den nächsten ca. 20 Jahren ungefähr drei Viertel der Anlagen, in denen bisher Kohle, Öl oder Erdgas genutzt werden, umgestellt werden¹. Diese Anlagen repräsentieren aber auch die bisherige Erfahrung der in diesem Feld tätigen Ingenieurbüros und Anlagenbauer, die im Wesentlichen über Erfahrung im Bau fossiler Prozesswärmeanlagen verfügen. Nur 8 % der Anlagen nutzen Strom und nur diese 8 % repräsentieren die bisher verfügbaren Kapazitäten und Erfahrung zum Bau elektrischer Prozesswärmeanlagen. Dies weist auf einen erheblichen Transformationsbedarf nicht nur bei der Energiebereitstellung, sondern auch bei den Ingenieurbüros und im Anlagenbau hin. Und ähnlich wie z.B. im Automobilbau geht es für die Zulieferer der alten Verbrennertechnologie darum, sich möglichst schnell einen Platz in der neuen elektrischen Technologie zu sichern, weil sonst der kaum abwendbare Verlust der Marktposition droht. Gleichermäßen bietet die Situation erhebliche Chancen für diejenigen, die über Wissen, Fähigkeiten und Kapazitäten zur Realisierung der neuen, zukunftsfähigen Lösungen verfügen, also quasi die Tesla's der Prozesswärmeversorgung.

4.2 Infrastrukturpolitik

Bei einer weiteren Betrachtungsweise wäre es möglich, auch die Anlagen zur Erzeugung von regenerativem Strom, die Elektrolyseanlagen und auch Wälder und landwirtschaftliche Anbauflächen als notwendige Infrastrukturen für eine sichere Versorgung mit Wärmeenergie zu betrachten. Unabhängig von der Frage der Definition ist jedenfalls eine Politik nötig, die sich in Zukunft nicht nur um die Verteilung und Speicherung von Energie kümmert, sondern auch um die Erzeugung von Primärenergie sowie ihre Umwandlung in die gewünschten Energieträger. Im Rahmen der vorliegenden Studie soll diese Frage aber zunächst nicht weiter vertieft werden.

Zur Dekarbonisierung der Prozesswärmeversorgung der Industrie sind aber unzweifelhaft verschiedene neue bzw. erweiterte Infrastrukturen erforderlich. Hierzu gehören Stromtrassen zur Verbindung von Schwerpunktregionen der Stromerzeugung mit Schwerpunktregionen des industriellen Strombedarfs sowie Wasserstoffleitungen und Wasserstoffpipelines für die Wasserstoffversorgung. Auch mögliche CCS-Lagerstätten wären den Infrastrukturen der Wärmeversorgung zuzurechnen.

4.2.1 Wasserstoff

Am Beispiel Niedersachsen lässt sich zeigen, welche Förderaktivitäten Bund und Land rund um den Wasserstoff entfalten (Niedersächsisches Wasserstoff-Netzwerk, 2022).

- ▶ Es soll der Aufbau von rund 850 MW Elektrolyseleistung in Niedersachsen in den nächsten fünf Jahren gefördert werden – d.h. rund 40 % der bundesweit über dieses Förderprogramm finanzierten Elektrolyseleistung. Das Bundeswirtschaftsministerium rechnet bei den aktuellen Projekten mit insgesamt über 2 GW bundesweit. Das Ziel in der Nationalen Wasserstoffstrategie beläuft sich auf 10 GW Elektrolyseleistung bundesweit bis 2030.
- ▶ Schaffung von mehr als 500 km Wasserstofftransportinfrastruktur in Niedersachsen, größtenteils durch Umwidmung bestehender Erdgasleitungen aber auch durch Neubau von Wasserstoffpipelines sowie die Umrüstung von Kavernen für die Erdgasspeicherung.

¹ Hinzu kommt der notwendige Umbau der Fernwärmequellen, der aber nicht von der Industrie, sondern den Wärmenetzbetreibern zu erledigen ist.

- ▶ Einstieg in die Transformation der Industrie hin zur Klimaneutralität durch Einsatz von grünem Wasserstoff, z.B. in der Stahlerzeugung und in Raffinerieprozessen.

Abbildung 3: In Niedersachsen geplante Wasserstoff-Infrastrukturen und -Projekte



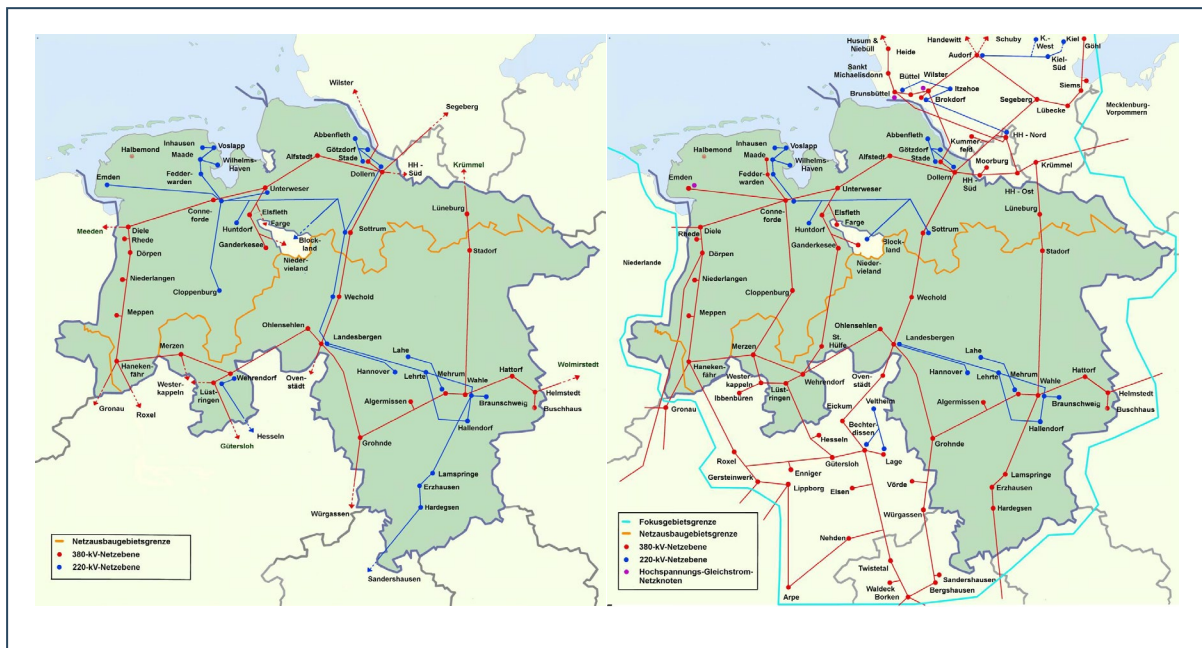
Quelle: Niedersächsisches Wasserstoff-Netzwerk (2022).

Damit rücken in Niedersachsen die aus Sicht der Wissenschaft prioritären Anwendungen des neuen Energieträgers Wasserstoff deutlich in den Vordergrund (Clausen, 2022). Die Kürze des nun entstehenden Wasserstoff-Kernnetzes impliziert aber auch, dass eine Umstellung des Erdgas-Verteilnetzes auf Wasserstoff weder geplant noch in Umsetzung ist. An einer Vielzahl von Standorten wird über Pipelines gelieferter Wasserstoff als Energieträger für Prozesswärme daher nicht zur Verfügung stehen. Wird Wasserstoff jedoch über Lkw angeliefert, bedeutet dies eine hohe Zahl von Transporten und damit hohe Kosten. Denn ein Lkw für den Transport von gasförmigem Wasserstoff besitzt nur eine Kapazität von bis zu 1.100 kg (ca. 36 MWh) bei bis zu 500 bar Nenndruck (EMCEL, 2019). Lkw, die flüssigen Wasserstoff im tiefkalten Zustand bei unter -253 °C transportieren, haben eine Zuladung von ca. 4.000 kg Wasserstoff (ca. 130 MWh). Ein wesentlich einfacherer Tankwagen für Heizöl kann dagegen bis zu 32.000 l (ca. 310 MWh) Heizöl transportieren.

4.2.2 Stromversorgung

Die zweite zentrale Infrastruktur zu Prozesswärmeversorgung der Industrie ist das Stromnetz, für das auch bereits der Ausbau vorbereitet wird.

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Netzknoten im Übertragungsnetz Niedersachsens



Quelle: EFZN, IfES, elenia, & CUTEC (2017), Ausbaustand im Jahr 2015 (links) und 2025 (rechts)

Das Ziel eines Gutachtens im Auftrag der niedersächsischen Landesregierung ist es, im Zuge der Energiewende die Energieversorgung bis 2050 auf nahezu 100 % Erneuerbare Energien umzustellen. Dabei wird die (anteilige?) Umstellung „aller Sektoren wie Verkehr, Wärmeversorgung oder Industrie auf den Energieträger Strom“ erwartet (EFZN et al., 2017, S. VI). Die Übertragungsnetze für elektrische Energie spielen daher im zukünftigen Energiesystem eine wichtige Rolle. Im Gutachten heißt es mit Blick auf die konzentrierte Einspeisung von Offshore-Windstrom an der Küste (EFZN et al., 2017):

„Entsprechend kommt den bis 2025 erwarteten HGÜ-Nord-Süd-Verbindungen eine wichtige Rolle im zukünftigen Übertragungsnetz zu, da diese einen Großteil des in Niedersachsen anlandenden Offshore-Windstroms direkt in die Lastzentren im Süden ableiten und damit das Übertragungsnetz in Niedersachsen entlastet wird.“

Die Versorgung zusätzlicher Verbraucher in der Industrie wird jedoch im Gutachten kaum angesprochen. Wichtig erscheint dagegen das Demand-Side-Management (EFZN et al., 2017, S. 28):

„DSM-Optionen in den Sektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen bieten in Einzelfällen große Lasten. In den meisten Betrieben ist zudem bereits eine Mess- und Steuerungstechnik vorhanden. Aktuell liegt das Potenzial der deutschen Industrie bei einer Leistung von 5-15 GW. Dieses wird jedoch nur in geringen Umfang genutzt. Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen stellen Maßnahmen bei der Wasseraufbereitung, bei Nachtspeicherheizungen, bei Kühl- und Gefrierprozessen, im Lebensmitteleinzelhandel und in Kühllhäusern Möglichkeiten für DSM dar.“

Betont wird hier die Netzdienlichkeit von Verbrauchern in der Industrie durch Demand Side Management, die sowohl mit Blick auf einen höheren Anteil an fluktuierenden Stromquellen (Nurdiawati & Urban, 2021) wie auch mit Blick auf die Bedienung großer fluktuierender Verbraucher in der Industrie

Bedeutung haben wird. In die Planungen der Netzgestaltung fließen jedoch zusätzliche Großverbraucher nicht offensichtlich erkennbar ein.

4.2.3 Verfügbarkeit von Biomasse

Industriepolitik ist keine Landwirtschaftspolitik. Dennoch verknüpfen z.B. Nurdiawati & Urban (2021) beide Fragen. Aus ihrer Sicht sollten selbst mit dem Blick auf Schweden mit seinen im internationalen Vergleich sehr reichlichen Biomasseressourcen die Verfügbarkeit von Biomasse und die Dynamik der Nachfrage unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten von der Politik überwacht werden. Darüber hinaus wären politische Maßnahmen zur Erhöhung des Biomasseangebots und zur Förderung einer möglichst effizienten Nutzung entscheidend, um ehrgeizige Klimaziele auf kosteneffiziente Weise zu erreichen (Nurdiawati & Urban, 2021). Mit Blick auf Niedersachsen weisen Mohnen et al. (2022, S. 83) darauf hin, dass sich *„aus der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse aus nachhaltigen Quellen die Notwendigkeit der Fokussierung ihres Einsatzes auf Anwendungsbereiche, in denen andere Technologien und Energiequellen nicht nutzbar sind“* ergibt.

4.2.4 Carbon Capture and Storage

Das in Folge der EG-Richtlinie 2009/31/EC in 2012 verabschiedete „Kohlendioxid-Speicherungsgesetz“ (KSpG) des Bundes gab den Bundesländern durch eine „Länderklausel“ die Möglichkeit, eine Erprobung und Demonstration der CCS-Technologie in bestimmten Gebieten zuzulassen. Dennoch fand CCS in Deutschland seither nicht statt. Im Frühjahr 2023 begann jedoch ein Stakeholderdialog zu einer Carbon Management-Strategie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Der Dialog knüpfte an eine erste Stakeholderbeteiligung zum Thema Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Utilization (CCU) im Oktober 2022 an und zielt auf die Erarbeitung einer Carbon Management Strategie, die allerdings im Frühjahr 2024 noch nicht vorliegt.

4.2.5 Fazit Infrastrukturpolitik

Eine kurze Betrachtung der Infrastrukturpolitik erfolgte mit beispielhaftem Fokus auf das Bundesland Niedersachsen. Während an der Entwicklung der Infrastrukturen für die Wasserstoffversorgung im Detail gearbeitet wird, ist ein planmäßiger Ausbau der Stromnetze zur Ertüchtigung für eine Elektrifizierung energieintensiver Wärmeprozesse sowie parallel zur Versorgung zahlreicher Wärmepumpen und der Elektromobilität nicht erkennbar. Das sieht auch die Studie zur Dekarbonisierung der niedersächsischen Wirtschaft ähnlich (Mohnen et al., 2022, S. 82):

„Während die Rolle von Wasserstoff für die Dekarbonisierung der Industrie bereits verstärkt im Fokus der politischen Diskussion steht, werden die Potenziale durch eine Steigerung der Elektrifizierung der Wärmebedarfe sowie die Rolle des direkten Einsatzes Erneuerbarer Energien wie Biomasse, Solar- oder Geothermie auf Niedersachsebene noch nicht umfassend in den Blick genommen.“

Der Technologiepfad CCS wurde durch das vollständige Verbot der Erprobung der Technologie durch das Niedersächsische Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (NKSpG) 2015 faktisch ausgeschlossen und auch das Thema der Produktivität der Wälder und der Natur wird gegenwärtig noch überhaupt nicht wahrnehmbar mit einer Politik zur Energieversorgung der Industrie in Verbindung gebracht.

4.3 Synchronisation von Diffusion und Exnovation

Der CO₂-Preis gilt als zentrales politisches Instrument um sowohl die Nutzung klimafreundlicher Technologien zu fördern als auch kohlenstoffintensive Aktivitäten zu unterbinden (Bataille et al., 2018). Mit Blick auf die Vielfalt von wärmeintensiven Produktionsprozessen, Wertschöpfungsketten und Endnutzungen spricht einiges für eine hohe Bedeutung ökonomischer Instrumente wie einem CO₂-Preis oder dem Emissionshandel, um einen Anreiz zu schaffen, die Treibhausgasemissionen auf breiter Front zu reduzieren. Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2020, S. 14) schlagen in ihrer auf die Stahl-, Chemie- und Zementbranche fokussierten Studie fünf ökonomische Instrumente vor:

- (1) „CO₂-Mindestpreis mit Grenzausgleichsregime: Ein ansteigender CO₂-Mindestpreis wird im EU-ETS als planbares Preissignal eingeführt. Zudem werden CO₂-basierte Abgaben auf Importe erhoben; Exporte in Regionen ohne vergleichbaren CO₂-Preis werden in Höhe der CO₂-Zusatzkosten kompensiert.
- (2) Carbon Contract for Difference (CfD): Bei Investitionen in CO₂-arme Schlüsseltechnologien erhalten Unternehmen für vermiedene CO₂-Emissionen projektbezogene Betriebskostenzuschüsse, wodurch Risiken reduziert werden. Die Förderhöhe wird über eine Auktion ermittelt, sie soll aber perspektivisch allen Unternehmen zur Verfügung stehen.
- (3) Grüne Finanzierungsinstrumente: Finanzierungskosten für Investitionen in CO₂-arme Technologien werden gesenkt, indem Kreditzinsen für Fremdkapital unter Marktniveau gesenkt werden und/oder das Risiko der Technologieentwicklung in den letzten Entwicklungsstufen staatlich abgesichert wird.
- (4) Klima-Umlage auf Endprodukte: Zur Refinanzierung anderer Instrumente wird auf ausgewählte Materialien (Stahl, Plastik, Aluminium und Zement) eine Abgabe – unabhängig von den CO₂-Emissionen ihrer Herstellung – erhoben.
- (5) CO₂-Preis auf Endprodukte: Beim Verkauf von Produkten an den Endverbraucher wird eine Abgabe auf Basis des CO₂-Gehalts der Materialien erhoben, was den Kostennachteil von CO₂-armen Produkten ausgleicht. Die Einnahmen können zur Refinanzierung anderer Instrumente genutzt werden.“

Diese fünf Instrumente können als beispielhaftes Instrumentarium für die politisch gewollte Herstellung von Wettbewerbsfähigkeit für klimafreundliche Prozesse und Produkte gesehen werden. Sie berücksichtigen verschiedene Technologien, die Problematik des Imports und Exports von konkurrierenden Produkten, die Förderung von Investitionen und sie legen durch die Instrumente 4 und 5 Teile der Transformationskosten auf die Endkunden um. Durch einen in Instrument (1) eingebauten Grenzausgleichsmechanismus soll auch ein Abwandern der energieintensiven Grundstoffindustrie verhindert werden (Carbon Leakage), während die Industrie für verarbeitete Produkte von dieser Gefahr ohnehin weniger betroffen ist (Fragkos, Fragkiadakis, & Paroussos, 2021).

Im März 2024 begann das BMWK mit ersten Schritten. Die Klimaschutzverträge nach dem Konzept der CO₂-Differenzverträge (engl. Carbon Contracts for Difference) sollen Mehrkosten von Unternehmen aus emissionsintensiven Branchen ausgleichen, die diesen durch die Errichtung und den Betrieb von klimafreundlicheren Anlagen im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen entstehen (BMWK, 2024). Mit dem Förderprogramm, das in Form eines Gebotsverfahrens abläuft und nach Förderkosteneffizienz und relativer Treibhausgasemissionsminderung entscheidet, sollen bis 2045 rund 350 Megatonnen CO₂-Äquivalente unmittelbar eingespart werden (BMWK, 2024).

Ergänzt werden soll dieses ökonomisch ausgerichtete Instrumentarium durch Verfahren der nachhaltigen öffentlichen Beschaffung sowie durch einige ordnungsrechtliche Vorschriften (Agora Energiewende & Wuppertal Institut, 2020, S. 14):

- (1) Quote für CO₂-arme Materialien: Produzenten von Konsumgütern werden verpflichtet, in ihren Endprodukten festgelegte Anteile von CO₂-frei produzierten Materialien zu verwenden, was Unternehmen sichere Absatzmärkte für CO₂-arme Materialien garantiert.
- (2) Quote für grünen Wasserstoff: Grüner Wasserstoff wird von Erdgashändlern verpflichtend in den Verkehr gebracht, um Power-to-X-Technologien für die langfristige Dekarbonisierung zu skalieren.
- (3) Änderungen von Bau- und Produktnormen: Vorschriften und Normen werden grundlegend überarbeitet und kontinuierlich angepasst, um Materialeffizienz und -substitution sowie die Nutzung neuer Baustoffe (zum Beispiel Zement auf Basis alternativer Bindemittel) im Bau zu vereinfachen.
- (4) Standards für recycelbare Produkte: Hersteller werden verpflichtet, Produkte so zu konzipieren, dass Recycling vereinfacht wird, um Stoffkreisläufe zu schließen und um eine CO₂-intensive Primärproduktion zu reduzieren.

Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2020, S. 14ff) sehen zwei Optionen für die Nutzung dieses Instrumentenkastens: Option 1: CO₂-Preis Only und Option 2: Policy Mix.

Option 1 würde nur wirken, wenn der CO₂-Preis vergleichsweise hoch angesetzt würde. Ein solcher hoher CO₂-Preis würde Produkte aus einzelnen Ländern je nach seiner Ausgestaltung u.U. deutlich benachteiligen. Wahrscheinlich ist daher aus Sicht der Studie, dass einzelne Nationen ein CO₂-Grenzausgleichsregime als Handelshemmnis ansehen und z.B. bei der WTO dagegen klagen oder mit anderen Gegenmaßnahmen reagieren. Dennoch ist das Instrument in der Debatte, weil es unter anderem von der französischen Regierung favorisiert wird.

In **Option 2** spiegelt der Instrumentenkasten von Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2020, S. 14ff) einen systemischen Ansatz wider, der nicht nur Wettbewerbsfähigkeit verschiedener mehr oder weniger CO₂-intensiver Produktionsverfahren herstellt, sondern parallel über Klima-Umlage und CO₂-Preis auf Endprodukte auch zu grundsätzlich steigenden Preisen für materialintensive Produkte und so auch dazu führt, dass die Preise mehr als bisher die ökologische Wahrheit sagen (Weizsäcker, Lovins, & Lovins, 1995). Damit wird sowohl ein Konsum weniger umweltbelastender Produkte als auch ein Minderkonsum insgesamt angereizt. Ein (kurzfristiger) Minderkonsum hingegen würde die Transformation der Industrie einfacher machen und deutlich beschleunigen, weil zumindest ein Anteil umweltbelastender Anlagen nicht durch andere ersetzt werden müsste, sondern einfach abgeschaltet werden könnte. Auch die oben bereits offensichtlich gewordene Problematik, überhaupt genügend grüne Energie für die Prozesse bereitzustellen, würde so geringer ausfallen.

4.4 Zwischenfazit

In Bezug auf die **Richtungssicherheit** der Wahl zukünftiger Energiequellen gibt es einen sich verstärkenden Konsens, Strom gegenüber Wasserstoff als Energieträger zu bevorzugen. Dies liegt an der höheren Effizienz in der Produktionskette und an einer schnelleren Verfügbarkeit. Auch Biomasse kommt zwar als Energieträger in Frage, jedoch ist sie knapp und könnte bei deutlich erhöhter Nachfrage auch teurer werden. Die internationale Literatur diskutiert auch die Weiternutzung von fossilen Energieträgern wie Erdgas in Verbindung mit CCS. Da aber CCS noch nicht großskalig verfügbar ist, hat diese Lösung kurzfristig keine Bedeutung. Außerdem verspricht sie mit Blick auf Erdgasnutzung

aufgrund der Dominanz der Methanemissionen in der Vorkette wenig Wirksamkeit im Klimaschutz und ist von Unsicherheiten geprägt.

Hinsichtlich der Entwicklung der notwendigen **Infrastrukturen** ist eine planmäßige Entwicklung und Förderung von Infrastrukturen für Wasserstoff durch die Politik zu beobachten. Mit Blick auf eine Veränderung des Strombezugs durch zusätzliche industrielle Großverbraucher und die dafür nötigen Ausbauaktivitäten des Stromnetzes, gerade in einer Zeit sich sprunghaft verbreitender Wärmepumpen und Elektroautos, sind öffentlich wahrnehmbare Aktivitäten zur Netzentwicklung bisher kaum zu beobachten.

Wirtschaftliche Anreize zur **Synchronisation von Diffusion** von Anlagen mit erneuerbaren Energieträgern **und Exnovation** von Anlagen mit fossilen Energieträgern werden zwar wissenschaftlich diskutiert, blieben aber in der Tagespolitik bisher weitgehend stecken. Mit der Förderrichtlinie zu Klimaschutzverträgen kam hier erstmals Bewegung auf (BMWK, 2024). Eine kurzfristige Dynamik entstand schon 2022 durch die kriegsbedingten Entwicklungen an den Energiemärkten, die eine starke Neigung zur Umstellung weg von den Fossilen anreizt. Gleichzeitig nutzte die Politik diesen Anlass im Feld der Gebäudewärme dazu, die Exnovation fossiler Energieverbraucher mit einschlägigen Gesetzen in Gang zu setzen (Die Bundesregierung, 2023, 2024).

Für den Fall einer erfolgreich und rasch einsetzenden Transformation stellt sich dann aber die Frage, wie schnell die notwendigen Ersatzanlagen auch verfügbar sein können. Dieser Frage wird das folgende Hauptkapitel der Studie gewidmet.

5 Innovationspolitik, Nischenbildung und Skalierung des Angebots im Bereich der Elektrowärme

5.1 Der Stand der Elektrifizierungstechnologien

Um den Bedarf an Innovationen und damit an Innovationspolitik sowie den Bedarf an Politiken zur Förderung der Skalierung des Angebots zu bestimmen ist es von Bedeutung, sich einen Überblick über die Verfügbarkeit von Lösungen der Elektrowärme im Markt des Anlagenbaus zu verschaffen.

Madeddu et al. (2020a) unterscheiden in ihrer Analyse die Technologiegruppen 1 bis 3. Die Technologiegruppen 1 und 2 betreffen dabei Technologien, die bereits vollständig entwickelt und in der Industrie etabliert sind. Technologiegruppe 3 umfasst Technologien, mit denen das maximale Elektrifizierungspotenzial erreicht werden kann, wenn auch Technologien mit höheren Unsicherheiten und geringerer technologischer Reife einbezogen werden. Eine detaillierte Charakterisierung der Technologien liefern Madeddu et al. in zusätzlichem Material zu ihrem Beitrag (Madeddu et al., 2020b)

Technologiegruppe 1 umfasst Technologien zur Kühlung, Raumheizung, Dampferzeugung und Trocknung, d. h. Prozesse, die bei niedrigen und mittleren Temperaturen betrieben werden. Sie sind mit Wärmepumpen, Kältemaschinen, mechanischer Brüdenverdichtung, Elektrokesseln, Infrarot-, Mikrowellen- und Radiofrequenz-Heizungen vollständig elektrifizierbar. Diese Technologien sind ausgereift und werden bereits in industrielle Anwendungen eingesetzt. Informationen über Marktanteile dieser Technologien an den verschiedenen Teilmärkten der industriellen Wärmeerzeugung liegen nicht vor (Madeddu et al., 2020a).

Technologiegruppe 2 umfasst Technologien, die ebenfalls bereits in der Industrie etabliert sind und Wärme über 400 °C liefern können. Sie umfasst Technologien wie Elektroöfen in verschiedenen Heizsystemen und Ausführungen, Widerstandserwärmung zum Brennen von Keramik, zum Schmelzen von Glas und zum Glühen und Härten sowie Induktions-, Widerstands- und Lichtbogenöfen zum Schmelzen und Raffinieren verschiedener Metalle. (Madeddu et al., 2020a). Die Notwendigkeit der technischen Verbesserung, der Skalierung der Produktion und der anwendungstechnischen Integration elektrischer Technologien in Produktionsprozesse wird für die Technologien der Technologiegruppe 2 von Madeddu et al. (2020a) als technisch anspruchsvoller als im Falle der Technologien der Technologiegruppe 1 eingeschätzt. Die Implementation beider Technologiegruppen kann dagegen nach Madeddu et al. (2020a) zeitparallel erfolgen. Die Beschreibung der Technologiegruppen lässt jedoch darauf schließen, dass die Implementation der Technologiegruppe 2 zeitaufwendiger sein könnte, da insgesamt mehr Verbesserungen in Form von Folgeinnovationen (Clausen & Fichter, 2021) und damit auch Widerstände bei den künftigen Anwendern zu erwarten sind.

Technologiegruppe 3 umfasst Technologien mit geringerem technologischem Reifegrad und höherer Unsicherheit in den Bereichen Chemie, Zement, und Stahl. In dieser Gruppe identifizieren Madeddu et al. (2020a) in drei Fokusbereichen wesentliche Innovationsbedarfe.

Für die drei Technologiegruppen bedarf es dreier zusammenwirkender politischer Programme:

- ▶ Technologiegruppe 1 erfordert die Herstellung von Wirtschaftlichkeit für elektrifizierte Prozesse (vgl. Abschnitt 4.3),
- ▶ Technologiegruppe 2 erfordert zusätzlich die Förderung von Forschung und Entwicklung, um die notwendigen leistungssteigernden und kostensenkenden Innovationen zu entwickeln und in die Serie zu bringen,
- ▶ Technologiegruppe 3 erfordert die mutige Förderung innovativer Technologien der Elektrifizierung sowie ihrer aufwendigen Pilotierung und Demonstration in großem Maßstab.

5.2 Innovationspolitik

Etwa 3 % des Nutzenergiebedarfs des **Chemiesektors** werden nach Madeddu et al. (2020a) für die Wärmeversorgung beim Steamcracken und Reformieren benötigt. Sowohl elektrische Steamcracker als auch Reformer sind aber in der chemischen Produktion noch nicht etabliert und gelten als sehr unsicher, da sie sich noch in der Phase der Forschung und Entwicklung befinden. Die Elektrifizierung dieser Prozesse erfordert daher gezielte Anstrengungen der F&E und damit u.U. spezielle Entwicklungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte.

Das Brennen von Klinker im **Zementsektor** wird bei 1.450 °C in großen Drehrohröfen mit Produktionsmengen von 3.000 - 10.000 Tonnen pro Tag betrieben. Das Projekt CemZero untersucht die Elektrifizierung in der Zementindustrie durch thermisches Plasma. Heutige Plasmageneratoren arbeiten mit einer für diese Anwendung zu geringen Heizleistung von bis zu 7 MW. Die Skalierung auf das für die Zementherstellung erforderliche Niveau von bis zu 100 MW ist daher eine F&E Aufgabe (Madeddu et al., 2020a). Nach einer in Zusammenarbeit mit Vattenfall durchgeführten Machbarkeitsstudie werden gegenwärtig drei Forschungsprojekte durchgeführt. Sie zielen darauf ab, vertiefte und detailliertere Kenntnisse über mögliche Wege zur Elektrifizierung der Zementherstellung und deren Auswirkungen auf den Prozess und das Produkt zu gewinnen. Die Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit mehreren Universitäten und Unternehmen durchgeführt und sollen bis 2025 abgeschlossen sein (Cementa, 2022). Andere Projekte in der Zementbranche verfolgen sektorenübergreifenden

Lösungen in Allianzen mit den Bereichen Grüne Energie, Wasserstoffproduktion, Wärme und Grundstoffindustrie, in denen auch die Kohlenstoffabscheidung eine Rolle spielt (Holcim, 2022).

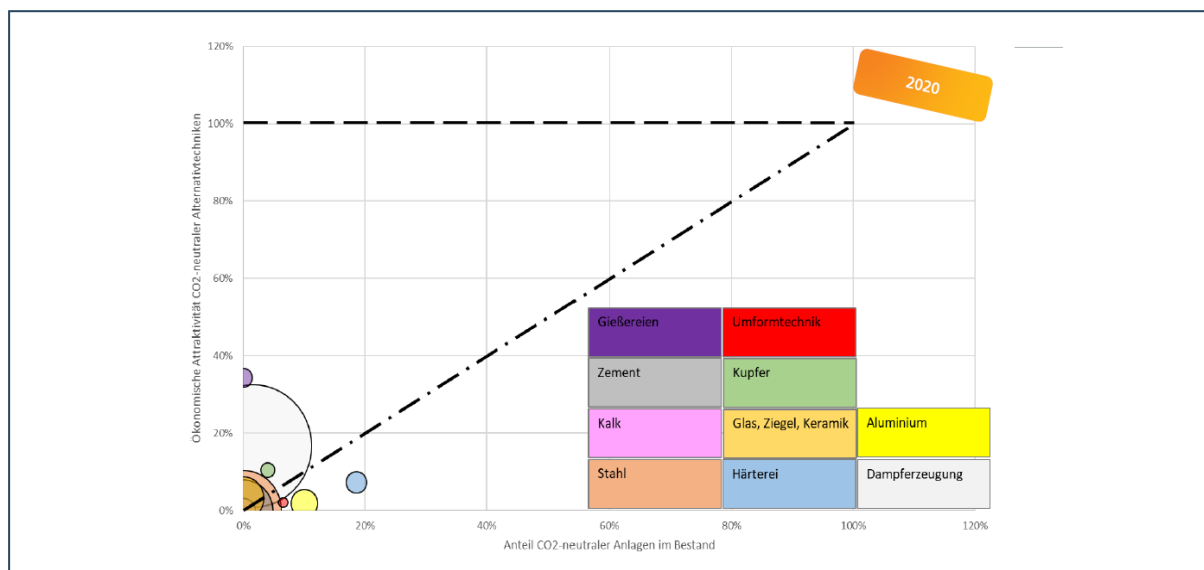
In der **Stahlindustrie** kann Wasserstoff als Reduktionsmittel für Eisen verwendet werden, was bei Verwendung von grünem Wasserstoff aus Elektrolyse eine indirekte Form der Elektrifizierung darstellt. Die kommerzielle Anwendung dieser Technologie ist z.B. bei der Salzgitter AG unter dem Projektnamen Salcos in Vorbereitung, die in ihrem Stahlwerk in Salzgitter Direkt-Reduktionsanlagen und Elektroöfen baut, die dann die Hochöfen und Konverter sukzessive ersetzen werden. Ziel ist ein Produktionsstart ab Ende 2025 (Salzgitter AG, 2022). Auch die elektrolytische Reduktion von Eisen (Electrowinning) könnte eine Option für die Elektrifizierung von Primärstahl sein (Yuan & Haarberg, 2009), obwohl sie bisher nur im Pilotmaßstab demonstriert wurde (Madeddu et al., 2020a). Und eine weitere Dekarbonisierung der Eisenproduktion könnte auch dadurch vorangetrieben werden, dass die Stoffkreisläufe von Eisen und Stahl besser geschlossen werden. Denn Sekundärstahl wird bereits in Elektrostahlwerken erzeugt und macht 40 % der europäischen Stahlproduktion aus (Madeddu et al., 2020a).

In allen drei Sektoren sind daher noch erhebliche F&E Anstrengungen erforderlich, die spezialisierte Forschung und die Unterstützung von teils extrem großen und teuren Pilot- und Demonstrationsanlagen erfordern. Beispielhaft beläuft sich allein der Eigenanteil der Salzgitter AG für die erste Ausbaustufe ihres Salcos-Projektes auf 723 Mio. €, hinzu kommt die beantragte öffentliche Förderung (Salzgitter AG, 2022).

5.3 Umstellung der Prozesswärmeerzeugung auf neue Energieformen

Die Prozesswärmeerzeugung wird in sämtlichen Branchen von fossilen Energieträgern dominiert. Die Untersuchung von Rehfeldt (2022) zeigt in keiner der untersuchten Branchen eine Marktdurchdringung (Diffusion) von Elektrowärmetechnologien über einen Anteil von 20 % im Bestand hinaus. Darüber hinaus schätzt die Untersuchung die ökonomische Attraktivität fast sämtlicher Märkte als schlecht ein. Etwas günstiger ist die Lage allenfalls bei der Dampferzeugung und in Gießereien.

Abbildung 5: Ökonomische Attraktivität und Diffusion im Bestand verschiedener Elektrowärmetechnologien



Quelle: Rehfeldt (2022)

Lange Lebensdauern und Modernisierungszyklen im industriellen Sektor von mehr als 20 - 25 Jahren erfordern rasche Entscheidungen (Rehfeldt, 2022). Aber in der Prozesswärmeerzeugung gibt es große Wissenslücken und Unsicherheiten für Unternehmen. Grund dafür ist die große Vielfalt an prinzipiell möglichen technologischen Alternativen, die für eine CO₂-neutrale industrielle Wärmebereitstellung infrage kommen. Nicht nur die Ausrüster-Branche, sondern auch die auf Wärmeanwendungen spezialisierten Ingenieurbüros müssen die jeweils besten Lösungen nicht nur kennen, sondern auch mit Blick auf die jeweilige Spezialanwendung optimieren und letztlich realisieren können. Zu beachten ist weiter, dass die meisten Anlagentypen in Deutschland nur in kleinen Stückzahlen existieren. Die zentrale Herausforderung ist daher der Aufbau von technologischem Know-how und nicht wie bei Massenprodukten die Skalierung der Produktion.

Die Dynamik des Prozesses steht nicht nur vor enormen ökonomischen Herausforderungen des Anlagenbaus. Durch Lobbyaktivitäten einzelner Wirtschaftsorganisationen wird teils Wasserstoff (Frontier Economics, 2023), teils Biomasse (BCG, 2021) als attraktive und langfristig bezahlbare Optionen dargestellt und so die Richtungssicherheit durch prognostisches Framing (Geels, 2014) relativiert.

5.3.1 Genehmigungsfristen

Die Verzögerung von Bauvorhaben durch institutionelle Regelungen ist kein neues Problem. Bei industriellen Projekten ist die Politik mit Maßnahmen zur Beschleunigung allerdings vorsichtiger als im Verkehr. Im Zuge des „Aufbaus Ost“ wurde das Verkehrswegeplanungsbeschleunigungsgesetz (Die Bundesregierung, 1991) beschlossen, welches den Ausbau der Autobahnen mit folgenden Regelungen beschleunigen sollte:

- ▶ Klare Fristen für das Verwaltungshandeln (§§ 3 und 4)
- ▶ Die Beschränkung des Rechtsweges auf das Verwaltungsgericht und die Aufhebung der aufschiebenden Wirkung der Revision (§5)
- ▶ Vorschriften zu Enteignung (§7), Eigentum (§8) und Entschädigung (§ 9)

Auch für das Vorantreiben des Baus von Anlagen mit Bedeutung für die Transformation zum Klimaschutz ist heute der Ablauf von Genehmigungsprozessen kritisch infrage zu stellen. Eine höhere Geschwindigkeit des Wandels zur Klimaneutralität wurde durch eine Klimaklage vor dem Bundesverfassungsgericht eingefordert. Diese Klage wurde durch ein Unternehmen unterstützt. Das Unternehmen wies in einem Schreiben an das Gericht auf den Zusammenhang der Dauer von Genehmigungsprozessen und dem Eintritt der klimaschützenden Wirkung der geplanten Maßnahme deutlich hin (Vetter & Zwick, 2021) und fragte angesichts hoher Anforderungen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie an die Zeitziele im Klimaschutz, warum von hiesigen Behörden Projekte, die den Klimawandel bekämpfen, genauso behandelt würden wie Projekte, die die Erderwärmung beschleunigen (Wenzel, 2021). Am Ende des Verfahrens entschied das Bundesverfassungsgericht, dass auch die Zeitziele und damit die Geschwindigkeit des Wandels im nationalen Klimaschutzgesetz von 2019 verbindlich sind (BVerfG, 2021).

Die lange Dauer von Genehmigungen sowie die dadurch eintretende Verzögerung von Klimaschutzmaßnahmen wurde auch in der Debatte um die Wärmewende in Hannover angesprochen (von Meding, 2021). Dr. Volker Müller von den Unternehmerverbänden Niedersachsen e.V. (UVN) argumentierte, dass die Dauer von Genehmigungsverfahren zuzüglich der Bauzeit von Anlagen einen beschleunigten Ausstieg auf der Kohle in nur fünf Jahren unmöglich mache (von Meding, 2021 Min. 41:40).

Die Beschleunigung von Genehmigungsprozessen ist politisch offenbar nicht unproblematisch, obwohl hierbei nur die Rechte einzelner Beschwerdeträger gegen das Erreichen gesellschaftlicher und für die gesamte Gesellschaft überlebenswichtiger Klimaziele abgewogen werden müssen. Zwar wertete das Bundesverfassungsgericht (BVerfG, 2021) die Bedeutung des Klimaschutzes mit seinem Beschluss zur Klimaklage relativ zu anderen Rechtsgütern deutlich auf, dennoch sollten Genehmigungsprozesse aus Sicht der Politik mit niederschweligen Eingriffen beschleunigt werden:

- ▶ So wäre zu erwägen, die Ausstattung von Genehmigungsbehörden und einschlägigen Verwaltungsgerichten mit Personal- und Sachmitteln zu verbessern, um so die unverzügliche Bearbeitung wesentlicher Vorhaben mit Auswirkung auf den Klimaschutz zu ermöglichen.
- ▶ Weiter könnte durch die Erarbeitung von Leitfäden und Handlungsanweisungen die Einholung von Gutachten sowie andere aufwendige Recherchen im Einzelfall verzichtbar gemacht werden. Auch hierdurch würde Zeit gespart.

Auch die Begleitung von Vorhaben durch Maßnahmen der Akzeptanzförderung in der Bevölkerung oder die Strategien zur Schaffung von Co-Benefits im direkten Umfeld geplanter Anlagen, wie dies z.B. von IÖW, IKEM & BBH (2020) im Feld der Windenergie beschrieben wird, bietet Perspektiven der Beschleunigung.

Letztlich sollte auch die Geschwindigkeit von Planungs- und Genehmigungsvorhaben engmaschig beobachtet und ggf. wirksamere Maßnahmen auch mit stärkerer Einschränkung der Rechte Einzelner in Erwägung gezogen werden. Dass, wenn Beschleunigung nicht nur politisch gewollt, sondern auch von der Bevölkerung akzeptiert wird, eine solche Beschleunigung möglich ist, zeigt die Realisierung der LNG-Terminals in der sogenannten „Deutschlandgeschwindigkeit“ (NMW, 2022).

Auch der 2022 geprägte Begriff des „überragenden öffentlichen Interesses“ für den beschleunigten Ausbau der Erneuerbaren Energien bietet eine Perspektive, wie sich Genehmigungen mit hoher Bedeutung für den Klimaschutz, wenn dies denn politisch gewollt wäre, beschleunigen lassen würden.

5.3.2 Fachkräfte

Mit der Verfügbarkeit von Fachkräften steht es in den Unternehmen und Ingenieurbüros des Anlagenbaus kaum besser als im Rest der Industrie. Anstrengungen auf allen Ebenen, die Verfügbarkeit von Fachkräften sicherzustellen, sind auch hier erforderlich.

5.3.3 Clusterförderung

Cluster gelten als Wachstumspole wirtschaftlicher Entwicklung. So ist die Förderung von Netzwerken und Clustern ein wichtiges Handlungsfeld der Wirtschafts- und Technologiepolitik sowie der regionalen Wirtschaftsförderung. Es geht darum, sich firmenübergreifend in einer Branche und entlang der Wertschöpfungskette zusammenzuschließen, um gemeinsam Projekte zu realisieren und Aufträge zu akquirieren. Auch die Vernetzung von Unternehmen und Forschungsinstitutionen steht oft auf der Agenda des Clustermanagements.

Viele funktionierende Cluster, gerade an Orten mit hoher unternehmerischer Dynamik und wissenschaftlicher Exzellenz, haben sich ohne unterstützende Aktivitäten des Staates entwickelt. Die Erfahrung zeigt aber auch, dass es bei der Clusterentwicklung noch viele ungenutzte Möglichkeiten gibt. Um diese Potenziale zu mobilisieren, ist die Förderung von Clustern und Netzwerken, eingebettet in die europäische Regional-, Technologie- und Mittelstandsförderung, notwendig.

Cluster mit der Ausrichtung Energietechnik und Umwelttechnik existieren bereits in großer Zahl. Auf der Clusterplattform (www.clusterplattform.de) werden hier hohe Zahlen dokumentiert, 75 Umweltcluster und 69 Energiecluster liegen fast gleichauf mit 76 IuK-Clustern und 73 Clustern für Produktionstechnologien². Der Blick auf die Cluster zu Energietechnologien lässt die höchsten Zahlen (knapp 20) bei übergreifenden Clustern mit mehreren bzw. vielen Schwerpunkten erkennen. Je ca. 15 Cluster fokussieren auf Wasserstoff und Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Es konnten in einer explorativen Analyse sechs Cluster identifiziert werden, bei denen auch die Energieeffizienz der Prozesstechnologien incl. elektrischer Lösungen im Fokus stehen:

- ▶ deENet Kompetenznetzwerk dezentrale Energietechnologien e. V. Nordhessen <https://www.deenet.org/>
- ▶ EFZN Energie-Forschungszentrum Niedersachsen <https://www.efzn.de/de/home/>
- ▶ Energy Saxony e. V. Das Energie-Cluster für Sachsen <https://www.energy-saxony.net/>
- ▶ innoEFF Innovations- und Effizienzcluster Freiburg i.Br. <https://www.innoeff.de/>
- ▶ Process4Sustainability. Cluster für eine klimaneutrale Prozessindustrie in Hessen: <https://www.provadis-hochschule.de/angewandte-forschung/zentrum-fuer-industrie-und-nachhaltigkeit-zin/process4sustainability/>
- ▶ Umweltkompetenzzentrum Rhein-Neckar e.V. <https://www.ukom.de/aktivitaeten/workshop-zu-dekarbonisierung-mit-aioneers-gmbh/>

Cluster könnten eine Möglichkeit sein, mit dem Fokus auf bestimmte Regionen auch auf Prozesselektrifizierung ausgerichtete Ausrüster und Ingenieurbüros des Anlagenbaus zu unterstützen. Jedoch sollte dabei nicht an die Gründung neuer Cluster gedacht werden. Existierende Cluster bieten bereits entwickelte Infrastrukturen, mit denen bestimmte Unterstützungsleistungen vergleichsweise rasch erbracht werden könnten.

6 Handlungsempfehlungen

In Bezug auf die **Richtungssicherheit** der Wahl zukünftiger Energiequellen gibt es einen sich verstärkenden Konsens, Strom gegenüber Wasserstoff als Energieträger zu bevorzugen. Dies liegt an der höheren Effizienz in der Produktionskette und an einer schnelleren Verfügbarkeit. Auch Biomasse kommt zwar als Energieträger in Frage, jedoch ist sie knapp und könnte bei deutlich erhöhter Nachfrage auch teurer werden. Die internationale Literatur diskutiert auch die Weiternutzung von fossilen Energieträgern wie Erdgas in Verbindung mit CCS. Da aber CCS noch nicht großskalig verfügbar ist, hat diese Lösung kurzfristig keine Bedeutung. Außerdem verspricht sie mit Blick auf Erdgasnutzung aufgrund der Dominanz der Methanemissionen in der Vorkette wenig Wirksamkeit im Klimaschutz und ist von Unsicherheiten geprägt.

Mit Blick auf die Entwicklung der notwendigen **Infrastrukturen** ist eine planmäßige Entwicklung und Förderung von Infrastrukturen für Wasserstoff durch die Politik zwar zu beobachten, beschränkt sich aber gegenwärtig auf das Wasserstoff-Kernnetz, welches primär sehr große Kunden beliefern wird, die wie die Stahl- oder Chemiebranche keine Alternative zu stofflicher Energie in Form von Wasserstoff haben. Mit Blick auf eine Veränderung des Strombezugs durch zusätzliche industrielle

² Vgl. www.clusterplattform.de, Stand vom 11.9.2022.

Großverbraucher und die dafür nötigen Ausbauaktivitäten des Stromnetzes, gerade in einer Zeit sich sprunghaft verbreitender Wärmepumpen und Elektroautos, sind planmäßige Aktivitäten zur Netzentwicklung bisher kaum sichtbar. Hier herrscht Handlungsbedarf.

Wirtschaftliche Anreize zur **Synchronisation von Diffusion** von Anlagen mit erneuerbaren Energieträgern **und Exnovation** von Anlagen mit fossilen Energieträgern werden zwar wissenschaftlich diskutiert, werden aber durch die Tagespolitik bisher kaum umgesetzt. Ein erster Schritt sind die Klimaschutzverträge (BMWK, 2024). Aber oft bestimmen noch schwache Anreize und viele Ausnahmen das Feld. Die Elektrifizierung der Prozesswärmeversorgung erfordert zukünftig eine mutige Industriepolitik. Grundsätzlich ist die Herstellung von Wirtschaftlichkeit für elektrifizierte Prozesse im Wettbewerb mit dem Einsatz fossiler Energien unverzichtbare Grundvoraussetzung. Ob dies über einen CO₂-Preis, den Emissionshandel oder durch Fördermittel erfolgt ist aus Sicht des Erfolges sekundär, hat allerdings erhebliche Auswirkungen auf den Staatshaushalt, der besonders durch Fördermittel stark belastet wird.

Die zentrale politische Herausforderung liegt darüber hinaus in der Innovationspolitik, Nischenbildung und Skalierung des Angebots im Bereich der Elektrowärme. Hier herrschen je nach Technologiegruppe verschiedene Herausforderungen:

- (1) Die Technologiegruppe 1 der serienreifen Technologien nach Madeddu et al. (2020a) erfordert zusätzlich Hilfen beim Aufbau von Know-how in der Ausrüsterbranche und spezialisierten Ingenieurbüros.
- (2) Die Technologiegruppe 2 der annähernd einsatzreifen Technologien erfordert zusätzlich die Förderung von Forschung und Entwicklung, um die notwendigen leistungssteigernden und kostensenkenden Innovationen zu entwickeln und in die Serie zu bringen.
- (3) Die Technologiegruppe 3 der noch in Entwicklung befindlichen Technologien erfordert die mutige Förderung innovativer Technologien der Elektrifizierung sowie ihrer aufwendigen Pilotierung und Demonstration in großem Maßstab.

Zusätzlich bedarf es einer Reihe von explorativen Schritten:

- ▶ Die Untersuchung der Marktanteile von serienfähigen Elektrifizierungstechnologien in den verschiedenen Prozesswärmemärkten ist erforderlich, um mögliche Unterstützungsaktivitäten für die schnellere Diffusion der verschiedenen Technologien ableiten zu können.
- ▶ Grundsätzlich sollte die Untersuchung der Möglichkeiten zur Förderung der schnellen Entwicklung von Lieferfähigkeit bzw. Skalierung von Schlüsseltechnologien vorangetrieben werden, um in diesem eher neuen Feld der Politik Erfahrungen zu sammeln und so ihre Anwendung bei der industriepolitischen Gestaltung weiterer Märkte nutzen zu können.
- ▶ Mit Blick auf die einzelnen Technologien ist auch die Untersuchung des Bedarfs an Folge- und Anpassungsinnovationen erforderlich.
- ▶ Und letztlich sollte auch die detaillierte Untersuchung des Bedarfs an Innovationsvorhaben zur Schließung noch existierender Elektrifizierungslücken vorangetrieben werden.

QUELLEN

- AG Energiebilanzen. (2021). *Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken*. Berlin. Abgerufen von https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/10/ageb_20v_v1.pdf
- Agora Energiewende, & Wuppertal Institut. (2020). *Klimaneutrale Industrie. Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*. Berlin und Wuppertal.
- Åhman, M., Nilsson, L. J., & Johansson, B. (2017). Global climate policy and deep decarbonization of energy-intensive industries. *Climate Policy*, 17(5), 634–649. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1167009>
- Bataille, C., Åhman, M., Neuhoff, K., Nilsson, L. J., Fishedick, M., Lechtenböhmer, S., ... Rahbar, S. (2018). A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production*, 187, 960–973. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.107>
- BCG. (2021). *Klimapfade 2.0*. Berlin. Abgerufen von <https://www.bcg.com/de-de/klimapfade>
- BMWK. (2024). *Richtlinie zur Förderung von klimaneutralen Produktionsverfahren in der Industrie durch Klimaschutzverträge*. Berlin. Abgerufen von <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/foerderrichtlinie-klimaschutzvertraege-frl-ksv.html>
- Breyer, C., Fasihi, M., & Aghahosseini, A. (2020). Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: A new type of energy system sector coupling. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 25(1), 43–65. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-9847-y>
- Bundesverband Geothermie. (2022). Sauerlach Geothermieanlage. Abgerufen 5. September 2022, von Geothermie website: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/s/sauerlach-geothermieanlage.html>
- Burchard, J., Hegnsholt, E., Holm, M., Klose, F., Ritter, D., & Schönberger, S. (2023). *Turning the European Green Hydrogen Dream into Reality: A Call to Action*. Berlin, Kopenhagen, Düsseldorf, München: Boston Consulting Group. Abgerufen von Boston Consulting Group website: <https://media-publications.bcg.com/Turning-the-European-Green-H2-Dream-into-Reality.pdf>
- BVerfG. (2021). *Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 — 1 BvR 2656/18 -, Rn. 1-270*. Karlsruhe: Bundesverfassungsgericht. Abgerufen von Bundesverfassungsgericht website: http://www.bverfg.de/e/rs20210324_1bvr265618.html
- Cementa. (2022). CemZero. Abgerufen 17. September 2022, von Cementa website: <https://www.cementa.se/sv/cemzero>
- Clausen, J. (2018). *Roadmap Elektromobilität Deutschland. Ziele, Chancen, Risiken, notwendige Maßnahmen und politische Initiativen*. Berlin: Borderstep Institut. Abgerufen von Borderstep Institut website: <https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/borderstep31-1-18roadmap-e-mobilitaet.pdf>
- Clausen, J. (2019). *Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland*. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J. (2022). *Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen*. Berlin: Borderstep Institut. Abgerufen von Borderstep Institut website: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2022/06/AP2-Wasserstoff-Potenziale-Bedarfe_27-6-2022.pdf

- Clausen, J., & Fichter, K. (2020). *Governance radikaler Systemtransformationen. Wirkung politischer Strategien und Instrumente in der Transformation großer Versorgungssysteme. Auswertung der Fallstudien aus Arbeitspaket 1*. Berlin: Borderstep Institut.
- Clausen, J., & Fichter, K. (2021). *Die Diffusion von Umweltinnovationen: Ein Beitrag zur Weiterentwicklung der deutschen Umweltinnovationspolitik*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Clausen, J., & Warnecke, N. (2019). *Governance radikaler Umweltinnovationen. Fallbeispiel Erneuerbare Wärme Baden-Württemberg*. Berlin: Borderstep Institut. Abgerufen von Borderstep Institut website: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2019/09/Fallstudie-BaW%C3%BC_20190912.pdf
- Devine-Wright, P. (2022). Decarbonisation of industrial clusters: A place-based research agenda. *Energy Research & Social Science*, 91, 102725. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102725>
- Die Bundesregierung. *Gesetz zur Beschleunigung der Planungen für Verkehrswege in den neuen Ländern sowie im Land Berlin (Verkehrswegeplanungsbeschleunigungsgesetz)*. , (1991).
- Die Bundesregierung. (2021). *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) zuletzt geändert August 2021*. Abgerufen von www.gesetze-im-internet.de/ksg/
- Die Bundesregierung. *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz)*. , (2022).
- Die Bundesregierung. (2023). *Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze*. Berlin. Abgerufen von https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/gesetzgebungsverfahren/Webs/BMWSB/DE/Downloads/waermeplanung/wpg-bgbl.pdf?__blob=publicationfile&v=1
- Die Bundesregierung. (2024). *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz—GEG)*. Berlin. Abgerufen von <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/index.html>
- EFZN, IfES, elenia, & CUTEC. (2017). *Gutachten Netzauslastung und Aufnahmekapazität für Erneuerbaren Strom*. Goslar. Abgerufen von <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/gutachten-unterstreicht-die-bedeutung-von-flexibilitaetsoptionen-und-netzausbau-159645.html>
- EMCEL. (2019, Juli 16). Wann lohnt sich der Transport von Wasserstoff per Wasserstoffpipeline? Abgerufen 21. Februar 2024, von <https://emcel.com/de/wann-lohnt-sich-der-transport-von-wasserstoff-per-wasserstoffpipeline/>
- Fragkos, P., Fragkiadakis, K., & Paroussos, L. (2021). Reducing the Decarbonisation Cost Burden for EU Energy-Intensive Industries. *Energies*, 14(1), 236. <https://doi.org/10.3390/en14010236>
- Fraunhofer ISE. (2018). *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien März 2018*. Freiburg i.Br. Abgerufen von <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.html>
- Frontier Economics. (2023). *Einordnung zukünftiger Wasserstoffkosten für die Wärmeversorgung in Deutschland*. Berlin. Abgerufen von <https://www.dvgw.de/leistungen/publikationen/publikationsliste/wasserstoff-preise-und-kosten-in-der-zukunft>
- Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31(8–9), 1257–1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Geels, F. W. (2014). Regime Resistance against Low-Carbon Transitions: Introducing Politics and Power into the Multi-Level Perspective. *Theory, Culture & Society*, 31(5), 21–40. <https://doi.org/10.1177/0263276414531627>

- Göke, L., Kemfert, Claudia, Kendzierski, M., & von Hirschhausen, C. (2021). *100 Prozent erneuerbare Energien für Deutschland: Koordinierte Ausbauplanung notwendig*. Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Abgerufen von Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung website: https://www.diw.de/de/diw_01.c.821878.de/publikationen/wochenberichte/2021_29_1/100_prozent_erneuerbare_energien_fuer_deutschland__koordinierte_ausbauplanung_notwendig.html
- Hank, C., Holst, M., Thelen, C., Kost, C., Längle, S., Schaadt, A., & Smolinka, T. (2023). *Site-specific, comparative analysis for suitable Power-to-X pathways and products in developing and emerging countries*. Freiburg i. Br. Abgerufen von <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-H2Global-Study-Power-to-X-Country%20Analysis.pdf>;
- Holcim. (2022). Dekarbonisierung Zementwerk Lägerdorf. Abgerufen 17. September 2022, von Holcim website: Dekarbonisierung Zementwerk Lägerdorf
- Hydrogen Council. (2021). *Hydrogen Insights. A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness*. Brüssel. Abgerufen von <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>
- IEA. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. Paris. Abgerufen von <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- IÖW, IKEM, & BBH. (2020). *Finanzielle Beteiligung von betroffenen Kommunen bei Planung, Bau und Betrieb von erneuerbaren Energieanlagen (FinBEE)*. Berlin. Abgerufen von https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2020/FinBEE_Bericht_WEA_09092020.pdf
- Jordan, U. (2020, Oktober). *Solarthermie. Technik, Herausforderungen & Perspektiven*. Gehalten auf der Crashkurs Wärmewende, Zoom. Zoom. Abgerufen von <https://www.bor-derstep.de/event/crashkurs-waermewende/>
- Kahlenborn, W., Clausen, J., Behrendt, S., & Göll, E. (Hrsg.). (2019). *Auf dem Weg zu einer Green Economy. Wie die sozialökologische Transformation gelingen kann*. Bielefeld: transcript.
- Kivimaa, P., & Kern, F. (2016). Creative destruction or mere niche support? Innovation policy mixes for sustainability transitions. *Research Policy*, 45(1), 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.09.008>
- Lütten, T. (2022, September). *Solarthermie als Problemlöser Bezahlbare und saubere Wärme für die Industrie*. Gehalten auf der VEA Webinar.
- Madeddu, S., Ueckerdt, F., Pehl, M., Peterseim, J., Lord, M., Kumar, K. A., ... Luderer, G. (2020a). The CO reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). *Environmental Research Letters*, 15(12), 124004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbd02>
- Madeddu, S., Ueckerdt, F., Pehl, M., Peterseim, J., Lord, M., Kumar, K. A., ... Luderer, G. (2020b). The CO reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat) Supplementary Material. *Environmental Research Letters*, 15(12), 124004.
- Mohnen, L., Thomasen, S., Weiß, D., Ingwersen, K., & Gulden, V.-S. (2022). *Transformationsstudie zur Dekarbonisierung der niedersächsischen Wirtschaft – Eine explorative Untersuchung zu Wissensstand und Handlungsmöglichkeiten der Transformation in Niedersachsen, Hrsg. V. Niedersachsen Allianz für Nachhaltigkeit*. Hannover. Abgerufen von <https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/pressemitteilungen/pi-135-transformationsstudie-215127.html>

- Niedersächsisches Wasserstoff-Netzwerk. (2022). Niedersachsen stellt Weichen für die Finanzierung von Wasserstoff-Großprojekten. Abgerufen 6. September 2022, von Wasserstoff-Niedersachsen website: <https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/finanzierung-wasserstoff/>
- NMW. (2022). Bundesweit erstes LNG-Terminal in Betrieb. Abgerufen 21. Februar 2024, von https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/uber_uns/presse/presseinformationen/bundesweit-erstes-lng-terminal-in-betrieb-218175.html
- Nurdiawati, A., & Urban, F. (2021). Towards Deep Decarbonisation of Energy-Intensive Industries: A Review of Current Status, Technologies and Policies. *Energies*, 14(9), 2408. <https://doi.org/10.3390/en14092408>
- Plan Energi. (2018). *Solar District Heating Trends and Possibilities—Characteristics of Ground-Mounted Systems for Screening of Land Use Requirements and Feasibility*. Kopenhagen. Abgerufen von <http://iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/SDH-Trends-and-Possibilities-IEA-SHC-Task52-PlanEnergi-20180619.pdf>
- Rehfeldt, M. (2022, Juni). *CO2-Neutrale Prozesswärmeerzeugung*. Gehalten auf der Fachgespräch, Berlin. Berlin.
- Richardson-Barlow, C., Pimm, A. J., Taylor, P. G., & Gale, W. F. (2022). Policy and pricing barriers to steel industry decarbonisation: A UK case study. *Energy Policy*, 168, 113100. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113100>
- Riechel, R., & Walter, J. (2022). *Kurzgutachten Kommunale Wärmeplanung*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Abgerufen von Umweltbundesamt website: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/kurzgutachten-kommunale-waermeplanung>
- Rosenow, J. (2023, April 17). Wasserstoff ist wichtig – aber mit ihm zu heizen, bleibt ein Märchen. Abgerufen 20. Mai 2023, von Focus.de website: https://m.focus.de/klima/experten/energieexperte-jan-rosenow-wasserstoff-ist-wichtig-aber-mit-ihm-zu-heizen-bleibt-ein-maerchen_id_191343994.html
- Rosenow, J. (2024). A meta-review of 54 studies on hydrogen heating. *Cell Reports Sustainability*, 1(1), 100010. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2023.100010>
- Salzgitter AG. (2022). Grünes Licht für grünen Stahl. Abgerufen 17. September 2022, von Salzgitter Ag website: <https://www.salzgitter-ag.com/de/newsroom/pressemitteilungen/details/gruenes-licht-fuer-gruenen-stahl-19904.html>
- Scientists for Future. (2022). *Heizen mit Holz: Knapp, teuer und unerwartet klimaschädlich*. Berlin. Abgerufen von <https://de.scientists4future.org/keypoints-kommunale-waermewende/>
- Umweltbundesamt. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE - Studie*. Dessau-Roßlau. Abgerufen von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf
- Umweltbundesamt. (2022a). Bioenergie. Abgerufen 4. September 2022, von Umweltbundesamt website: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/bioenergie#bioenergie-ein-weites-und-komplexes-feld->
- Umweltbundesamt. (2022b). Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Abgerufen von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren>
- Vetter, P., & Zwick, D. (2021, April 8). Affront gegen den Gönner – Tesla unterstützt Klage gegen Bundesregierung. *Die Welt*. Abgerufen von

https://amp.welt.de/wirtschaft/article229930115/Wegen-Gigafactory-Tesla-unterstuetzt-Klage-gegen-Bundesregierung.html?__twitter_impression=true

von Meding, K. (Regisseur). (2021). *HAZ-Forum: „Früher abschalten oder nicht? Wie geht es mit dem Kraftwerk in Stücken Weiter?“* Hannover. Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=mq2EHN3fJKk>

Warwick, N., Griffiths, P., Keeble, J., Archibald, A., Pyle, J., & Shine, K. (2022). *Atmospheric implications of increased Hydrogen use*. Cambridge & Reading. Abgerufen von www.gov.uk/government/publications/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use

Weizsäcker, E. U. von, Lovins, A. B., & Lovins, L. H. (1995). *Faktor Vier: Doppelter Wohlstand - halbiertes Naturverbrauch ; der neue Bericht an den Club of Rome* (1. Aufl). München: Droemer Knaur.

Wenzel, F.-T. (2021, April 9). Ärger um Gigafactory: Tesla ist auf Krawallkurs. *Hannoversche Allgemeine Zeitung*, S. 11.

Witsch, K. (2023, Oktober 13). Grüner Wasserstoff ist deutlich teurer als gedacht. *Handelsblatt*. Abgerufen von <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/bcg-studie-gruener-wasserstoff-ist-deutlich-teurer-als-gedacht/29443386.html>

Yuan, B., & Haarberg, G.-M. (2009). Electrowinning of Iron in Aqueous Alkaline Solution Using Rotating Disk Electrode. *Revue de Métallurgie*, 106(10), 455–459. <https://doi.org/10.1051/metal/2009078>

Zachmann, G., Holz, F., Roth, A., McWilliamas, B., Sogalla, R., Meissner, F., & Kemfert, C. (2021). *Decarbonisation of Energy Determining a robust mix of energy carriers for a carbon-neutral EU*. Luxemburg. Abgerufen von <https://econpapers.repec.org/RePEc:diw:diwpok:pbk175>