



FRIEDRICH NAUMANN
STIFTUNG Für die Freiheit.

POLICY PAPER

KLIMASCHUTZ- INNOVATION

Maximilian Luz Reinhardt

ANALYSE

Impressum

Herausgeberin

Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit
Truman-Haus
Karl-Marx-Straße 2
14482 Potsdam-Babelsberg

🌐/freiheit.org

📘/FriedrichNaumannStiftungFreiheit

📺/FNFreiheit

📷/stiftungfuerdiefreiheit

Autor

Maximilian Luz Reinhardt, Themenmanager Wirtschaft und Nachhaltigkeit

Redaktion

Liberales Institut der Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit

Kontakt

Telefon +49 30 220126-34

Telefax +49 30 690881-02

E-Mail service@freiheit.org

Stand

November 2022

Hinweis zur Nutzung dieser Publikation

Diese Publikation ist ein Informationsangebot der Friedrich-Naumann-Stiftung für die Freiheit. Die Publikation ist kostenlos erhältlich und nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf nicht von Parteien oder von Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden (Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie Wahlen zum Europäischen Parlament).

Lizenz

Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

Inhalt

EXECUTIVE SUMMARY	4
1. AUSGANGSLAGE	5
1.1. Zielkompatibilität.....	5
1.2. Was wir schon geschafft haben.....	6
1.3. Wirtschaftliche Unabhängigkeit	6
2. ELEKTRIFIZIERUNG	7
2.1. Klimaneutrale Energiequellen	7
2.1.1. Erneuerbare Energien	8
2.1.2. Kernenergie	8
2.1.3. Carbon Capture	8
2.2. Infrastrukturelle Voraussetzungen.....	9
2.3. Elektrische Zukunft.....	10
2.3.1. Anpassungen in den Haushalten	10
2.3.2. Industrielle Anwendungen	11
3. WASSERSTOFF	12
3.1. Wasserstoffförderung.....	12
3.2. Herausforderungen.....	12
3.3. Anwendungsszenarien.....	13
3.3.1. Netzstabilisierung	14
3.3.2. Industrielle Anwendung.....	14
3.3.3. Mobilität	15
4. EFFIZIENZSTEIGERUNG	16
4.1. Wärme.....	16
4.2. Digitalisierung	16
5. HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN	18
5.1. Anreize schaffen.....	18
5.2. Portfoliolösungen anstreben.....	19
5.3. Flexible Technologien	19
5.4. Internationale Kooperation	19
5.5. Finanzierung erleichtern	20

Executive Summary

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Um ihn zu begrenzen, müssen die menschlich verursachten Treibhausgasemissionen zunächst deutlich verringert und letztlich gänzlich verhindert oder gebunden werden. Gleichzeitig darf dabei der wirtschaftliche und gesellschaftliche Fortschritt der vergangenen zwei Jahrhunderte keiner falsch verstandenen Enthaltensamkeit geopfert werden.

Um langfristig ein nachhaltiges und klimaverträgliches Wirtschaftsgefüge zu erreichen, bedarf es neuer Technologien und innovativer Lösungen. Deren Relevanz wird im Zusammenhang mit den aktuellen Versorgungsengpässen auf den Gas- und Energiemärkten umso deutlicher. Denn Russlands völkerrechtswidriger Angriffskrieg auf die Ukraine sowie die erpresserische Instrumentalisierung der deutschen und europäischen Energieknappheit seitens des Kremls verdeutlichen, dass eine grundlegende Umgestaltung stattfinden muss. Vor diesem Hintergrund bieten sich mehrere Lösungen an:

- 1. Sektorkopplung:** Unter Sektorkopplung versteht man den verstärkten Einsatz von erneuerbarem Strom in den Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie. Das kann entweder direkt, durch Elektrifizierung, oder indirekt durch klimaneutralen Wasserstoff und Wasserstoffderivate geschehen. Dadurch werden weniger fossile Energien verwendet und das Klima geschont. Sektorkopplung ermöglicht dabei auch in Bereichen jenseits des Klimaschutzes deutliche Verbesserungen. So kann unter anderem der Ausstoß von umwelt- und gesundheitsschädlichem Feinstaub durch neue Technologien deutlich verringert werden. Die hierfür notwendigen Entwicklungen sind zwar schon in der Umsetzung, werden ihr volles Potential allerdings erst mittelfristig entfalten können. Bis dahin müssen die verbleibenden beschränkenden Flaschenhälse in Infrastruktur und Regulierung gelöst werden.
- 2. Effizienzsteigerung:** Auch losgelöst von der verwendeten Primärenergie können effizientere Technologien den Energiebedarf senken. Dabei ermöglicht beispielsweise eine breitere Nutzung von Abwärme deutliche Einsparpotentiale. Auch eine umfangreiche Digitalisierung kann immense Potentiale zur Verringerung der eingesetzten Primärenergie heben. Zum Teil können einzelne, auf den ersten Blick kleine Technologieveränderungen schon gewaltige Auswirkungen haben: So benötigen zum Beispiel LED-Leuchten nur rund ein Zehntel der Energie, die konventionelle Glühlampen benötigen würden. Dadurch bieten sich auch kurzfristig große Energieeinsparpotentiale, denn vielerorts ist eine Umstellung noch nicht konsequent vollzogen worden.

Die Ausgangslage für eine weitreichende Anpassung an die neuen Gegebenheiten am Energiemarkt und eine konsequente Umstellung der Haushalte und der Industrie ist aktuell vielversprechend. Die hohen Kosten der fossilen Energien steigern die Attraktivität von Investitionen in sparsame und innovative Technologien. Allerdings verunsichern der massive Kostenanstieg und die unübersichtlichen wirtschaftlichen Perspektiven viele Unternehmen und schrecken mögliche Investoren ab. Daher müssen die richtigen Rahmenbedingungen gesetzt werden, um den Umstieg zu erleichtern:

- 1. Emissionszertifikate:** Der Ausstoß von Treibhausgasen muss konsequent mit Kosten assoziiert sein. Dadurch wird die Entwicklung und Umsetzung von emissionsparenden Maßnahmen angereizt. Emissionszertifikate ermöglichen eine effiziente Bepreisung der Treibhausgase und treiben so Innovation und Fortschritt.
- 2. Technologieoffenheit:** Angesichts andauernder technologischer Entwicklungen und Fortschritte ist es unklug, sich auf einzelne Technologiepfade zu beschränken. Stattdessen ist eine prinzipielle Technologieoffenheit sinnvoll. So kann ein Portfolio aus unterschiedlichen Lösungen entstehen.
- 3. Nachhaltige Investitionen:** Investitionen in Übergangstechnologien sollten jetzt so ausgestaltet werden, dass sie auch in einer klimaneutralen Zukunft noch Anwendung finden können. Beispielsweise sollten Flüssiggas-terminals auch möglichst unkompliziert zur Anlandung von Wasserstoff ertüchtigt werden können.
- 4. Internationale Zusammenarbeit:** Nur durch einen freien Ideen- und Warenaustausch können internationale Synergien zum Klimaschutz gehoben werden. Daher sind internationale Kooperation und Handel essenziell für den Fortschritt und die voranschreitende Entwicklung von Klimaschutzinnovationen.
- 5. Risikokapital:** Innovative Ideen müssen allerdings auch in der Praxis umgesetzt werden. Hierfür bedarf es erheblicher finanzieller Mittel. Insbesondere bei jungen und technologiegetriebenen Unternehmen spielt Risikokapital eine immer größere Rolle bei der Finanzierung. Eine zunehmende Kapitaldeckung der Rentenkassen könnte helfen, die hier entstandene Lücke zu schließen.

Nur mit dem menschlichen Erfindergeist können wir das Vorschreiten des Klimawandels aufhalten. Dabei muss in allen Dingen global gedacht werden. Daher sollten auch überzeugende Technologien auf freien Weltmärkten ausgetauscht und gegebenenfalls verfeinert werden. Erst dann entfalten Klimaschutzinnovationen ihr volles Potential.

1. Ausgangslage

Die Erde erwärmt sich so schnell und so stark wie nie zuvor. Das vergangene Jahrzehnt war wahrscheinlich das wärmste seit mindestens 20.000 Jahren.¹ Das ist kaum verwunderlich, wurden doch immer neue Dürre- und Hitzerekorde geknackt.² Kurzum: Der Klimawandel ist nicht mehr von der Hand zu weisen. Zwar ist ein wesentlicher Teil der langfristigen Temperaturentwicklung wahrscheinlich auf eine natürliche Dynamik aus Wärme- und Kälteperioden zurückzuführen,³ doch die Geschwindigkeit der Erhitzung hat seit zwei Jahrhunderten dramatisch und in noch nie vorher dagewesener Weise zugenommen.

Hauptverantwortlich für diese erschreckende Entwicklung ist die Industrialisierung – genauer genommen der massive Anstieg des Verbrauchs fossiler Energieträger.⁴ Diese setzen bei der Verbrennung das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) frei, welches die Sonnenenergie innerhalb der Atmosphäre bindet und eine Erwärmung der Erde zur Folge hat. Auf diese Weise werden die natürlichen klimatischen Prozesse der vergangenen Jahrtausende beschleunigt und verstärkt. Allerdings stammen diese Treibhausgase nicht nur aus der Verbrennung von fossilen Energieträgern. Auch die Chemieindustrie, Landwirtschaft und andere Sektoren treiben durch ihre Emissionen den Klimawandel voran.

Das Problem: Der Klimawandel ist nicht lokal beschränkt. Treibhausgasemissionen betreffen das Weltklima – nicht ausschließlich den Ort, an dem sie ausgestoßen werden. Das heißt, ein Land oder eine Region kann sich durch klimaschonendes Verhalten nicht selbst vor den Folgen des Klimawandels schützen, wenn der Rest der Welt weiterhin Treibhausgase emittiert. Daher ist der Klimawandel ein wahrlich globales Problem und benötigt daher globale Antworten.

Aber der Klimawandel ist auch noch aus einem anderen Grund ein besonders schwer zu lösendes Problem: Bei einem von fossilen Kraft- und Energiestoffen beherrschten Wirtschaftssystem bedeutet ein Verzicht auf den Einsatz dieser Energieträger auch einen Verzicht auf Wohlstand und Wirtschaftswachstum – zumindest hat dieser Zusammenhang in der Vergangenheit Bestand gehabt. Die Krux daran: Politische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Akteurinnen und Akteure werden zumeist an ihren kurzfristigen Ergebnissen gemessen – insbesondere in Demokratien.

Die Veränderung des Klimas ist allerdings weder kurzfristig bemerkbar noch unmittelbar abzustellen. Vielmehr besteht der Klimawandel aus langwierigen und subtilen Prozessen, die sich erst über die Zeit aufsummieren und nach Jahrzehnten manifestieren – dann wenn es schon zu spät ist. Die große Herausforderung für Gesellschaft und Politik liegt darin, die langfristige Perspektive im Blick zu behalten, obwohl es keinen kurzfristigen Problemdruck gibt.

Dabei kann es sehr helfen, wenn die eingeführten Klimaschutzmaßnahmen die Lebensqualität der Bürgerinnen und Bürger nicht nennenswert verschlechtern, sondern im besten Fall sogar verbessern. Der Schlüssel hierfür liegt in technologischem Fortschritt und gesteigerter Effizienz. Das ermöglicht, dass ein gleichwertiges Ergebnis mit niedrigerem Material- und Energieeinsatz erreicht werden kann. Für die Verbraucherinnen und Verbraucher können sich Investitionen in effizientere und innovative Technologien sogar positiv auf das Portemonnaie auswirken. Dabei können manche innovativen Lösungen gleich mehrere Probleme beheben. Denn obwohl Klimateffekte sehr präsent in der öffentlichen Debatte sind, sind sie keinesfalls die einzige Belastung, die von aktuellen Technologien ausgeht.

1.1. Zielkompatibilität

In Deutschland sind fossile Energieträger mit rund 85 Prozent des nationalen Treibhausgasausstoßes eindeutig die wichtigsten Treiber der Klimawandels.⁵ Die Verwendung fossiler Kraftstoffe wirkt sich – über ihren globalen Einfluss auf das Weltklima hinaus – auch auf lokaler Ebene aus: Denn bei deren Verbrennung entstehen gleichzeitig auch Schadstoffe, die sich unmittelbar negativ auf die direkte Umgebung auswirken. Beispielsweise entstehen bei der Nutzung von Kohle in der Industrie oder zur Strom- und Wärmegeneration auch Feinstaub und hochreaktive Kleinstpartikel, die mit den klimaschädlichen Abgasen ausgestoßen werden. Diese Stoffe belasten die Luft und führen zu Gesundheitsrisiken für alle Lebewesen in der Umgebung.⁶ Zwar verringern die legalen Vorgaben hierzulande den Schadstoffausstoß deutlich – dennoch sterben in der EU jährlich mehr als 20.000 Menschen vorzeitig an den Folgen des Kohlekraftausstoßes.⁷ Technologische Entwicklungen könnten nun aber sowohl den Energiebedarf der einzelnen Anwendungen verringern, als auch durch alternative und innovative Energiegewinnungsmethoden die Verwendung von fossilen Energieträgern in Gänze verhindern. Dadurch werden sowohl Klimateffekte als auch sonstige Umwelt- und Gesundheitsbelastungen verhindert – ein weiterer Punkt, der die soziale Akzeptanz solcher Maßnahmen erhöhen kann.

¹ https://www.pik-potsdam.de/de/produkte/infothek/buecher_broschueren/images/von-pergamon-nach-potsdam-himmel-und-erde

² <https://www.augsburger-allgemeine.de/panorama/hitzerekorde-deutschland-hitzerekorde-bei-hitzewelle-2022-id63211941.html>

³ <https://www.epa.gov/climatechange-science/causes-climate-change>

⁴ <https://www.climatechange.environment.nsw.gov.au/causes-climate-change>

⁵ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#energiebedingte-treibhausgas-emissionen>

⁶ <https://www.aerzteblatt.de/archiv/171122/Umwelt-und-Gesundheit-Gefahr-aus-Kohle-kraftwerken>

⁷ <https://www.wwf.de/2016/juli/unter-derselben-staubglocke>

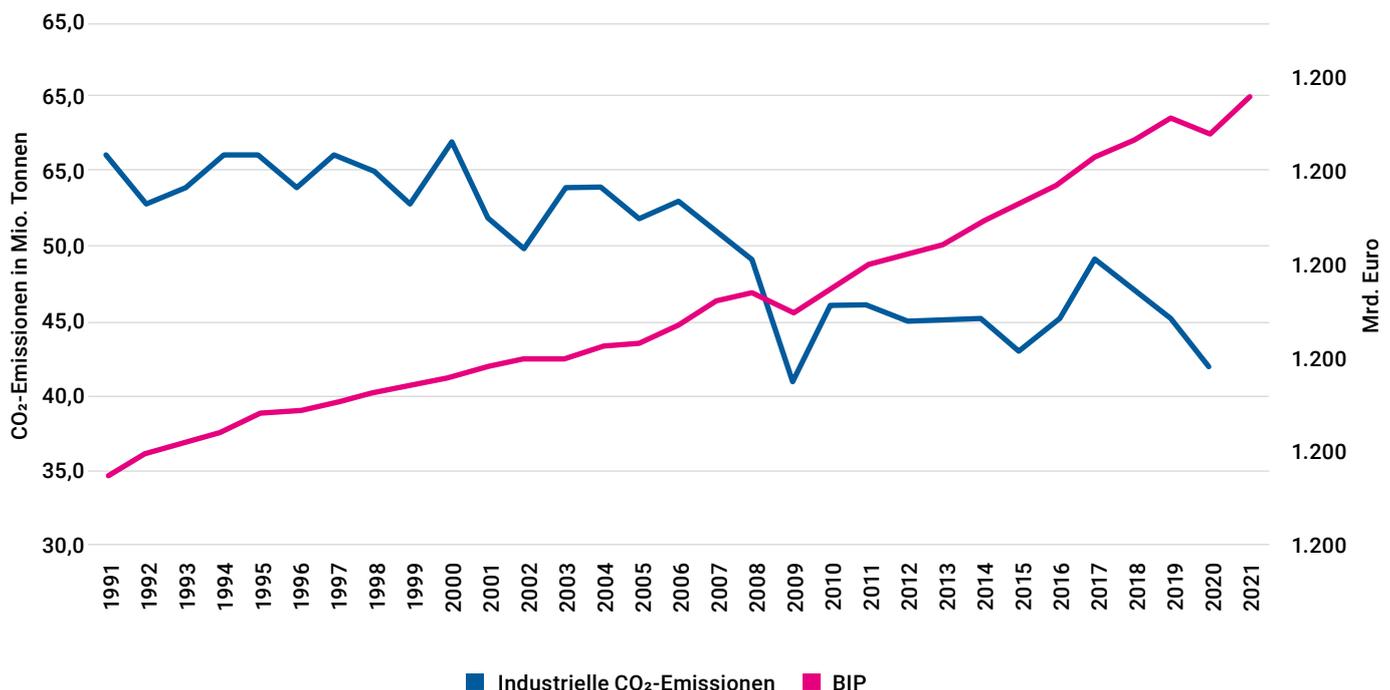
1.2. Was wir schon geschafft haben

Die vergangenen drei Jahrzehnte in Deutschland haben gezeigt, dass innovativer Klimaschutz und Wirtschaftswachstum Hand in Hand gehen können: Während die Industrie ihren Ausstoß an Kohlenstoffdioxid seit 1990 kontinuierlich verringert hat, ist das Bruttoinlandsprodukt – der gängigste Indikator für den gesamtwirtschaftlichen Wohlstand – deutlich gestiegen (siehe **Abbildung 1**). Dass diese zunächst

konkurrierenden Ziele miteinander vereinbar wurden, ist auf Innovation, insbesondere effizientere Produktionsprozesse, und den Ausbau erneuerbarer Energiegewinnung zurückzuführen. Viele niedrighwelligen Verbesserungspotentiale wurden nun allerdings schon gehoben. Um auch weiterhin den Ausstoß von Treibhausgasen zu verringern und gleichzeitig wirtschaftliches Wachstum zu fördern, sind weitere innovative Lösungen notwendig.

Abb. 1 | Die deutsche Wirtschaft ist trotz eines fallenden CO₂-Ausstoßes deutlich gewachsen.

Entwicklung der industriellen Treibhausgas-Emissionen in Deutschland (in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent) im Vergleich zur wirtschaftlichen Leistung (in Milliarden Euro)



Quelle: Statistisches Bundesamt, Stand: August 2022; bmwi.de; Statista 2022

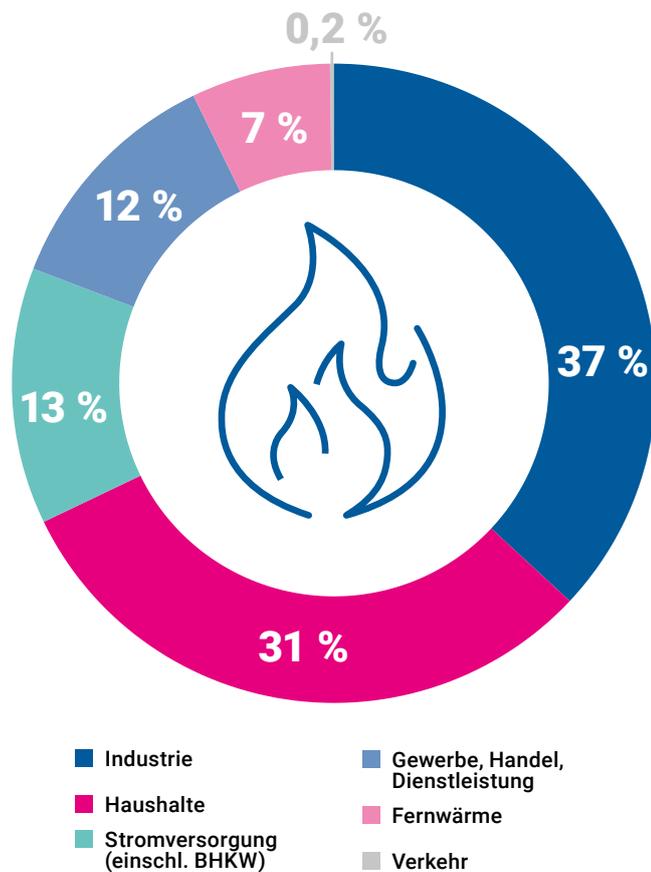
1.3. Wirtschaftliche Unabhängigkeit

Effiziente und innovative Technologien verringern nicht nur die Umwelt- und Klimabelastung. Sie verringern auch die energiepolitische Abhängigkeit von Drittstaaten mit fragwürdigen politischen Agenden. Beispielsweise hat der russische Überfall auf die Ukraine die empfindliche Abhängigkeit des deutschen Energiesystems von russischen Energieträgern verdeutlicht. Die Europäische Union hat als Reaktion auf diesen Bruch mit dem Völkerrecht Sanktionspakete gegen die russische Wirtschaft erlassen – seither ist der Außenhandel mit Russland weitestgehend zum Erliegen gekommen. Allein der Handel mit fossilen Energieträgern, allen voran Erdgas, spielte seit dem Krieg noch eine wichtige Rolle. Doch nachdem Russland zunächst unter fadenscheinigen Gründen die Energielieferungen nur drosselte, strömt nun überhaupt kein russisches Gas mehr nach Deutschland. Andere europäische Partner teilen dieses Schicksal. Der Kreml gibt westliche Sanktionen gegen die

russische Wirtschaft und Waffenlieferungen in die Ukraine als Grund für die Lieferungseinstellung an. Auch losgelöst von dem immensen Vertrauensbruch Russlands und der unrechtmäßigen Instrumentalisierung der europäischen Energieabhängigkeit wäre der Angriffskrieg und die in diesem Rahmen begangenen Verstöße gegen grundlegendste Menschenrechte mehr als genug, um eine Rückkehr zur Energiepartnerschaft mit Russland langfristig auszuschließen. Und spätestens durch die bislang ungeklärte Sabotage an den Verbindungspipelines wäre das auch physisch unmöglich. Besonders Deutschland ist von dieser neuen Realität betroffen. Denn hierzulande sind in der Vergangenheit sowohl Energieverbräuche der Wirtschaft als auch der Privathaushalte zu einem nicht unwesentlichen Umfang durch günstiges russisches Gas bedient worden. Insgesamt stammten rund 55 Prozent des deutschen Erdgasverbrauches aus russischen Quellen.⁸

⁸ https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0325_fortschrittsbericht_energiesicherheit.pdf?__blob=publicationFile&v=14

Abb. 2 | Heizbedarfe und industrielle Anwendungen sind die wichtigsten Erdgasverbraucher in Deutschland.
Deutschlands anteiliger Erdgasverbrauch (2021)



Quellen: BDEW; Stand 03/2022; Grafik: justinroque via Getty Images

Dabei flossen rund 31 Prozent des deutschen Gasvolumens direkt zu den Privathaushalten, wo es zum Heizen und Kochen genutzt wurde und weitere 7 Prozent in die Wärmenetze. Etwa 37 Prozent des Gases wurden in der Industrie abgerufen. Dort wurde das Gas entweder für Prozesswärme oder als Kohlenstoffquelle genutzt. Der Handels- und Dienstleistungssektor bezog 12 Prozent des verwendeten Gases. Zuletzt wurden in der Vergangenheit 13 Prozent des deutschen Gaskonsums in Gaskraftwerken verstromt (siehe Abbildung 2). Dieser Anteil hätte zukünftig im Rahmen der Energiewende zunehmen sollen. Technologiegetriebene Effizienzsteigerungen könnten nun nicht nur das Klima schützen, sondern zusätzlich auch die Abhängigkeit von Energieimporten aus Unrechtsregimen verringern und langfristig sogar Kosten für die Verbraucherinnen und Verbraucher senken.

2. Elektrifizierung

Als einer der wichtigsten Hebel gegen den Klimawandel könnte sich die Elektrifizierung von bislang fossil dominierten Prozessen herausstellen. Denn während selbst bei vergleichsweise effizienten, fossilen Technologien weiterhin Treibhausgase freigesetzt werden, können diese Emissionen durch Elektrifizierung verhindert werden – gesetzt, man nutzt Strom aus klimaneutralen Quellen. Aber auch ungeachtet von der Herkunft des verwendeten Stroms, sind viele innovative, elektrifizierte Prozesse effizienter als die etablierten fossilen Pendanten. Das heißt: Man muss weniger Energie aufwenden, um ein erwünschtes Ergebnis zu erzielen. Das liegt unter anderem an den höheren energetischen Wirkungsgraden. Es gibt also eine Reihe an Gründen, die für eine zunehmende Elektrifizierung in der Industrie und den Privathaushalten sprechen.

2.1. Klimaneutrale Energiequellen

Um den tatsächlichen Klimaeffekt eines Prozesses gegen Null streben zu lassen, muss die Energie aus klimaneutralen

Quellen stammen. Das heißt, dass bei der „Gewinnung“ keine klimabelastenden Abgase ausgestoßen werden dürfen. Das kann über mehrere Wege durch Innovation erreicht werden.

Exkurs:

Aus einer thermodynamischen, also physikalischen Perspektive wird Energie nicht gewonnen, sondern nur umgewandelt. Wenn man beispielsweise in einem Fahrzeug einen Liter Kraftstoff verwendet, wandelt man die im Kraftstoff gebundene chemische Energie in Wärme und Bewegungsenergie um. Dasselbe gilt für Wind- oder Wasserkraft, bei denen die Bewegungsenergie der Luft bzw. des Wassers in elektrische Energie umgewandelt wird. Daher ist die Rede von „Energiegewinnung“ an sich nicht korrekt. Stattdessen ist die korrektere Bezeichnung Energieumwandlung.

2.1.1. Erneuerbare Energien

Der vermutlich wichtigste Beitrag zur klimaneutralen Stromversorgung ist den erneuerbaren Energieträgern zuzurechnen. Zu diesen gehören vornehmlich Solar- und Windkraftanlagen, aber auch weniger diskutierte Technologien wie Geothermie- und Wasserkraftwerke sind Teil dieser Kategorie. Ein Vorteil dieser Energiegewinnungsmethode ist, dass sie unabhängig von Energiestoffen ist. Denn während beispielsweise ein Gaskraftwerk mit Erdgas betrieben werden muss, um elektrischen Strom in das Netz speisen zu können, ist das bei einer Windkraftanlage nicht notwendig. Dadurch entstehen keine variablen, also von der abgerufenen Energiemenge abhängigen Kosten. Das hat auch zur Folge, dass die erneuerbaren Energien unabhängig von einer kontinuierlichen Kraftstoffversorgung im konventionellen Sinne sind.

Das hat politische Folgen: In der aktuellen Situation ist Deutschland auf Grund seiner energiepolitischen Abhängigkeit von Russland erpressbar. Bei erneuerbaren Energien kann der Energiefluss nicht mehr durch politische Interessen einzelner Akteure beeinflusst werden. Er ist dann allerdings auch durch niemanden mehr kontrollierbar – und daher auch zum Teil starken Variationen der Witterung ausgeliefert. So kann beispielsweise eine Flaute Windkraftträder lahmlegen oder aber Nebel und dichte Wolkendecken die Sonnenstrahlung abschwächen – hinzu kommt der natürliche Tag-Nacht-Rhythmus, der selbstverständlich auch zu Schwankungen bei der Sonnenenergie führt. Die beschriebene Variabilität gilt zunächst hauptsächlich für Strom aus Wind- und Solarkraft, könnte im Verlauf des Klimawandels allerdings auch für vermeintlich versorgungssichere erneuerbare Quellen wie Wasserkraft zur Realität werden.⁹ Denn durch immer längere Trockenperioden und folglich verringertes Wasservolumen geht auch die Effektivität und Zuverlässigkeit der Wasserkraft deutlich zurück. Daher wird die mangelnde Kontrollierbarkeit und die alleinige Abhängigkeit von Witterungsbedingungen gleichermaßen zum Fluch und zum Segen der erneuerbaren Energien.

Und doch können innovative Netze und digitale Hilfsmittel bei der Abfederung dieser Schwankungen helfen. Beispielsweise können intelligente Batteriespeicher die Volatilität der Erneuerbaren stabilisieren.¹⁰ Solche Systeme können in Zeiten von Überproduktion befüllt werden, um diesen Strom dann während Phasen geringerer Einspeisung zurück ins Netz zu leiten. Somit können auch die zum Teil massiven Preisschwankungen auf dem Strommarkt abgefangen werden – was weitere Investitionen in die Erneuerbaren anreizen kann (dazu mehr in Sektionen 2.2. und 4.2.). Die enormen Kostensenkungen, die die erneuerbaren Anlagen sowohl bei ihrer Produktion als auch im Betrieb im Laufe der vergangenen Jahre erfahren haben, haben die Rentabilität zusätzlich steigen lassen. Längst interessieren die Investoren nicht nur staatliche Subventionen, sondern erwirtschaftete Erträge. Mit Gesetzesinitiativen der Ampelkoalition werden nun Zulassungsverfahren beschleunigt und die Hürden für einen ökologisch und wirtschaftlich sinnvollen Ausbau der Kapazitäten gesenkt.

⁹ <https://www.erneuerbareenergien.de/energiewende-20/speicher/klimawandel-wegen-klimawandel-deutlich-weniger-strom-aus-wasserkraft>

¹⁰ <https://smartgrids-bw.net/projekte/demonstrationsprojekte-smart-grids-und-speicher/>

2.1.2. Kernenergie

Kaum ein Thema wird in Deutschland so kontrovers diskutiert wie die Kernkraft. Ökonomisch betrachtet sprechen beim Thema Kernkraft hauptsächlich die Unfallrisiken während des Betriebes eines Kraftwerkes sowie die Lagerung bzw. „Entsorgung“ des radioaktiv belasteten Materials, häufig als Ewigkeitskosten bezeichnet, gegen diese Energieform. Obgleich die Sicherheitsrisiken bei sachgerechter Wartung sehr gering sind, können die potenziellen Auswirkungen eines sicherheitsrelevanten Vorfalles immens sein. Hinzu kommen die hohen Kosten, die der Bau und der Abriss eines solchen Kraftwerkes mit sich bringen.¹¹ Letztere spielen allerdings nur beim Neubau eine Rolle. Beim Weiterbetrieb sind die Kosten für den Bau schon entstanden, und die Rückbaukosten würden unabhängig von einer Laufzeitverlängerung entstehen – und sind daher auch schon eingepreist. Daher ist dieser Kostenpunkt für Streckbetrieb beziehungsweise eine Zulassungsverlängerung bereits laufender zertifizierter Kernkraftanlagen zu vernachlässigen.

Für die Kernkraft sprechen hingegen die vergleichsweise geringen Kosten pro Kilowattstunde. Will heißen: Die variablen Kosten, die pro eingespeister Energieeinheit entstehen, sind deutlich geringer als beispielsweise bei Kraftwerken, die mit fossilen Energieträgern gespeist werden. Ein weiterer Vorteil, den Atomkraftwerke im Vergleich zu konventionellen, fossilbetriebenen Anlagen haben ist, dass sie im Betrieb kein CO₂ ausstoßen. Das heißt, der Klimaeffekt aus dem Betrieb eines Kernkraftwerkes ist zu vernachlässigen.¹²

Bei einer nüchternen und faktenorientierten Bewertung der Kernkraft müssen also die Kosten und Risiken dem zu erwartenden gesellschaftlichen Nutzen gegenübergestellt werden. Angesichts der aktuellen Unsicherheit und der gerade für den Winter absehbaren Knappheit auf den Strommärkten können die grundlastfähigen Atommeiler eine wichtige Entlastung bieten und zur wirtschaftlichen Entspannung beitragen. Vor diesem Hintergrund ist die kürzlich entschiedene Laufzeitverlängerung der verbliebenen drei aktiven Atommeiler bis Mitte April 2023 eine kluge Entscheidung.¹³ Abhängig von den weiteren Entwicklungen auf den Energiemärkten wird im Frühjahr 2023 eine Neubewertung der Situation notwendig sein. Bis dahin bleibt die langfristige Zukunft der Atomkraft in Deutschland umstritten.

2.1.3. Carbon Capture

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung des Klimaeffektes der Stromproduktion besteht in der Anwendung von sogenannten *Carbon Capture*-Anlagen. Sie ermöglichen die Abscheidung des Kohlenstoffdioxids aus den Abgasen eines mit fossilen Energieträgern befeuerten Kraftwerkes. Das so gewonnene CO₂ kann dann in weiteren chemischen Prozessen, zum Beispiel in der Lebensmittel- und Plastikindustrie,

¹¹ <https://www.energate-messenger.de/news/205572/studie-atomstromkosten-bei-ueber-einer-billion-euro>

¹² <https://www.iaea.org/sites/default/files/21/10/nuclear-energy-for-a-net-zero-world.pdf>

¹³ <https://www.deutschlandfunk.de/bundeskanzler-scholz-am-15-april-ist-mit-der-atomkraft-in-deutschland-schluss-100.html>

Anwendung finden.¹⁴ Allerdings sind die dazu benötigten Verfahren kompliziert und teuer und die Nachfrage nach CO₂ als Grundstoff im Vergleich zur aktuell ausgestoßenen Menge übersichtlich. Folglich ist fraglich, inwieweit diese Methoden eine signifikante Anwendung finden werden. Alternativ kann das abgeschiedene Kohlenstoffdioxid unterirdisch verpresst werden. Hierfür bieten sich natürliche, unterirdische Kavernen beispielsweise von mittlerweile versiegten Erdgasvorkommen oder aber besonders aufnahmefähige Gesteinsschichten an.¹⁵ Hierbei entstünde zwar kein ökonomischer Mehrwert, aber die Treibhausgase würden zumindest nicht das Klima belasten. Allerdings sind nur einige wenige solcher Anlagen bislang über den Pilotstatus hinausgekommen. Unternehmen in Island und Norwegen geben Grund zur Hoffnung.¹⁶ Hinzu kommt, dass sowohl das Abscheiden des Kohlenstoffdioxids als auch das Verpressen des Gases in die relevanten Gesteinsschichten äußerst energieaufwendig ist. Weiterhin befürchten Kritiker, dass sich durch den zusätzlichen Druck des eingepressten Gases der Grundwasserspiegel verändern oder es zu Verunreinigungen des Grundwassers kommen könnte.¹⁷

Die Energiebilanz spricht eher dafür, direkt klimaneutrale Energiequellen zu verwenden, anstatt weiterhin fossile Kraftstoffe zur Energiebereitstellung zu nutzen – nur um die entstehenden Treibhausgase dann aufzufangen und weiter zu verarbeiten. Das würde den energetischen Wirkungsgrad der Kraftwerke vermutlich auch zukünftig in die Unwirtschaftlichkeit senken. Allerdings könnten innovative technische Entwicklungen eine Neubewertung dieser Zusammenhänge notwendig machen. Dennoch wird *Carbon Capture* eine wichtige Rolle im Kontext einer modernen und innovativen Industrie einnehmen. Prozesse wie die Zementherstellung sind, aus chemischen Gründen, schwerlich ohne die Freisetzung von CO₂ möglich. Die beschriebenen innovativen Ansätze können dabei helfen, auch solche Sektoren in die Klimaziele einzubinden. Fest steht: Das von der UN mit der Erforschung des Klimawandels beauftragte, internationale Expertengremium *IPCC* sieht in der Abscheidung von Kohlenstoff eine der Schlüsseltechnologien, die für ein Erreichen der internationalen Klimaziele notwendig sein werden.¹⁸

2.2. Infrastrukturelle Voraussetzungen

Innovative, elektrifizierte und klimaschonende Anpassungen werden durch einen Ausbau der Infrastruktur begleitet werden müssen. Wie in Sektion 2.1.1. angeschnitten, können Batteriespeicher Leistungsschwankungen aus der erneuerbaren Stromgenerierung abmildern. Damit ist aber nicht genug getan. Für die weitreichende Elektrifizierung bedarf es unter anderem auch eines umfassenden Ausbaus der Netzinfrastruktur. An Trassen, die den windreichen Norden Deutschlands mit den industriellen Verbrauchern im Süden verbinden,

mangelt es heute schon. Mit einer zunehmenden Elektrifizierung des Alltags wird der Leitungsinfrastruktur eine noch höhere Relevanz zukommen. Tatsächlich geht der Leitungsausbau insgesamt zu schleppend voran – und das gilt für alle Leistungsebenen. Von der Hochspannungsleitung, die Strom über weite Strecken transportiert, bis zur lokalen Anbindung der Haushalte und sonstigen Endverbraucher. Doch neben den hohen Kosten, die mit dem Ausbau einhergehen, wird der Fortschritt bislang hauptsächlich durch komplizierte und langwierige Genehmigungsverfahren sowie den Widerstand von Bürgerinitiativen ausgebremst. Durch die Novellierung des Netzausbaubeschleunigungsgesetzes durch die Ampelkoalition im Juli 2022 können nun insbesondere institutionelle Hindernisse leichter genommen werden.¹⁹ Dieses Ziel wird unter anderem durch vereinfachte Zulassungsprozesse und eindeutigere Verantwortungsverteilung erreicht.

Doch neben dem Ausbau des inländischen Versorgungsnetzes ist auch eine Vertiefung der grenzüberschreitenden Kooperation vonnöten. Die rechtlichen Grundlagen hierfür sind zwar schon gelegt – allerdings hängt auch hier die Vernetzungsinfrastruktur den zu erwartenden zukünftigen Ansprüchen hinterher. Daher wird die intereuropäische Vernetzung mit Nachdruck vorangetrieben.²⁰ Und das mit gutem Grund: Um zukünftig eine stabile und kontinuierliche Stromversorgung im europäischen Raum gewährleisten zu können, wird eine stärkere Vernetzung notwendig. Denn während die Volatilität der erneuerbaren Energiegewinnung zwar regional betrachtet nur bedingt oder unter enormen Aufwand eine Versorgungssicherheit gewährleisten kann, könnte bei einem gemeinsamen europäischen Ausbau diese Unsicherheit abgemildert werden. Ein Beispiel: Wenn an einem Tag an der deutschen Küste der Wind ruht, wäre die deutsche Stromversorgung für sich allein gestellt nicht mehr zu gewährleisten. Dieses Risiko sinkt, wenn die Energieversorgungssysteme innerhalb von Europa vernetzt sind. So kann beispielsweise Spanien von windreichen Herbsttagen an der Nordsee profitieren und Deutschlands Industrie könnte im Sommer aus dem Sonnenenergiepotential Italiens schöpfen. Dafür bedarf es allerdings einer möglichst widerstandsoptimierten, zuverlässigen und leistungsstarken internationalen Leitungsinfrastruktur.²¹

Zweifelsfrei: Eine kostenintensive Investition – aber eine, die sich lohnen wird. Sie würde nicht nur die Stromversorgung sicherstellen, sondern auch die Marktpreise stabilisieren. Denn aktuell fallen die Marktpreise an den Strombörsen in Deutschland an sonnigen und windreichen Sommertagen bis ins Negative. Der Grund: ein Stromüberangebot. Im Winter hingegen ist das Risiko von sogenannten Dunkelflauten deutlich höher. Will heißen, weder Photovoltaik- noch Windkraftanlagen können auf Grund unzureichender Sonneneinstrahlung und mangelndem Luftstrom das erwartete Angebot leisten. Daher steigen dann auch die Preise an den Börsen. Eine bessere intereuropäische Vernetzung würde auch das Angebot in Europa synchronisieren und könnte bei der Stabilisierung der Energiepreise helfen.

¹⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/carbon-capture-utilization-ccu>

¹⁵ <https://www.nzz.ch/wirtschaft/klimawandel-ist-mineralisierung-von-co2-der-koenigsweg-ld.1646514>

¹⁶ <https://futurezone.at/science/norwegen-co2-speicher-meer-nordsee-ccs-carbon-capture-storage/402112662>

¹⁷ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage>

¹⁸ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_summaryforpolicymakers-1.pdf

¹⁹ <https://industrie.de/arbeitswelt/bdi-bitkom-vdma-bewerten-osterpaket-positiv/>

²⁰ https://ec.europa.eu/info/news/in-focus-making-eus-energy-infrastructure-fit-climate-neutrality-2021-jun-15_de

²¹ <https://www.50hertz.com/de/Netz/Netzausbau/InterkonnektorenundPhasenschieber>

2.3. Elektrische Zukunft

Eine wie oben geschilderte Initiative zum Ausbau, Umbau und zur Modernisierung des Stromsystems ist natürlich nur die halbe Miete. Sie schafft zwar die Grundlage für eine innovative und klimaschonende Zukunft, bringt aber ohne eine parallele Umstellung der Verbraucher keine tatsächliche Verbesserung. Um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, ist eine sektorübergreifende Elektrifizierung notwendig. Vor diesem Hintergrund bekommt der Begriff Sektorkopplung eine besondere Bedeutung. Sektorkopplung heißt, dass nahezu alle Energieverbräuche aus dem Wirtschaftsgefüge und den privaten Haushalten aus dem Stromsektor bedient werden. Anstatt auf Gas, Kohle oder Öl als Energiequelle zu setzen, werden alle Verbräuche direkt mit Strom oder Stromerzeugnissen bedient. Wenn dieser Strom klimaneutral „gewonnen“ wird, wirkt sich der Verbrauch auch nicht auf das Klima aus.

2.3.1. Anpassungen in den Haushalten

Private Haushalte können vor allem bei ihren Heiz- und Mobilitätsbedürfnissen auf Elektrifizierung setzen und so auf innovative Weise das Klima schonen. Beispielsweise können Luftwärmepumpen konventionelle Gas- oder Ölheizungen ersetzen. Daraus ergibt sich eine Vielzahl an Vorteilen: So entfallen beispielsweise die klimaschädlichen Treibhausgasemissionen, die durch konventionelle Heizungen freigesetzt werden – rund achtzehn Prozent der deutschen Emissionen sind dem Beheizen und Kühlen von Gebäuden zuzuschreiben.²² Hinzu kommt, dass gesundheitsschädliche Feinstaubausstöße so-

wie die Emissionen von giftigen Gasen ebenfalls wegfallen. Ein weiterer Punkt, der für die Anwendung solcher Systeme spricht, ist deren Energieeffizienz – durch sie können Gebäude bei einem deutlich geringeren Einsatz von Primärenergie auf dieselben Temperaturen wie konventionelle Systeme heizen. Je nach Umgebungstemperatur und erwünschter Innentemperatur sind Wirkungsgrade von bis zu 400 Prozent möglich.²³ Das heißt, man erhält die vierfache Menge an Wärmeenergie im Vergleich zur eingesetzten elektrischen Energie – die zusätzliche Wärmeenergie wird dabei der Umgebung entzogen. Besonders für Neubauten sind Luftwärmepumpen eine attraktive Alternative zu konventionellen, mit fossilen Energien befeuerten Heizungsanlagen. Im Bestand hängt es von der Bausubstanz, den verbauten Heizkörpern, der Größe und der Lage des Gebäudes ab, ob sich eine Umrüstung lohnt.²⁴ Angesichts der intensiven Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten, die in diesem Bereich vorgenommen werden, sind starke Kostensenkungen und weitere Effizienzgewinne absehbar.

Hochskaliert können Wärmepumpen, aber auch andere elektrische Wärmeerzeuger wie zum Beispiel Elektrokessel, auch in Wärmenetze einspeisen. Somit können auch große Anlagen oder ganze Quartiere auf klimaneutrale Weise beheizt werden.²⁵ Im Kontext der Sektorkopplung spricht man bei diesen Technologien von *Power-to-Heat*, denn elektrische Energie wird in Wärme umgewandelt.

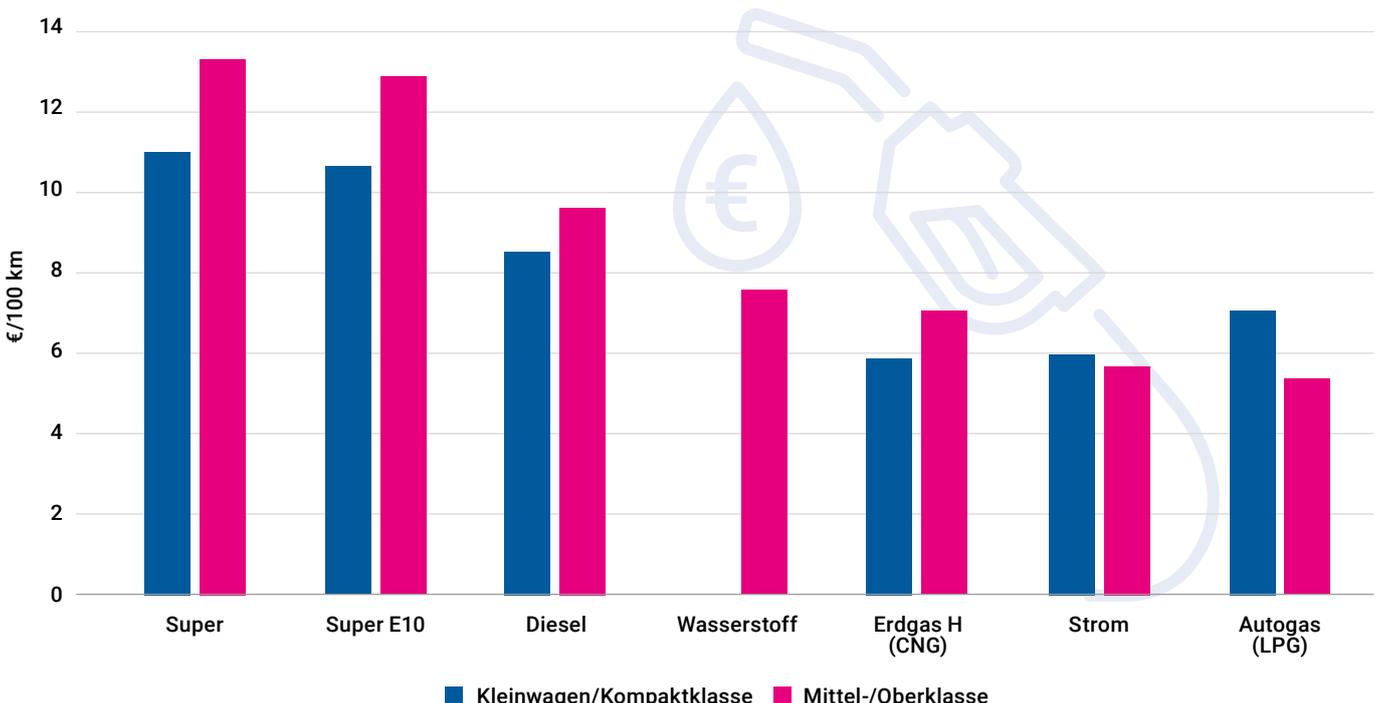
²² <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/zahl-der-woche-fast-ein-fuenftel-aller-co2-emissionen-in-deutschland/>

²³ <https://www.nachhaltigleben.ch/bauen/wirkungsgrad-waermepumpe-785>

²⁴ <https://www.buderus.de/de/waermepumpe/nachrueten>

²⁵ https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20200427_Power-to-Heat.pdf

Abb. 3 | Schon heute sind die Kosten pro gefahrenem Kilometer bei batterieelektrischen Fahrzeugen am günstigsten. Vergleich der Energiekosten für Personenkraftwagen in Deutschland im Jahr 2022 (in Euro pro 100 km)



Ähnlich schaut es bei den Mobilitätsbedürfnissen aus. Die konventionellen Verbrennungsmotoren werden mit fossilen Kraftstoffen wie Benzin oder Diesel betrieben. Der Verkehrssektor ist in der Folge für rund ein Fünftel der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich.²⁶ Bei deren Verbrennung werden Treibhausgase und Schadstoffe freigesetzt. Auch hier kann Sektorkopplung helfen. Heute bauen viele Automobilhersteller ihr Angebot an batterieelektrischen Alternativen aus. Neben der verbesserten Klimaverträglichkeit spricht auch hier die Effizienz für die Elektrifizierung. Während moderne Verbrenner nur zwischen 40 und 45 Prozent der eingespeisten chemischen Energie in Bewegungsenergie umwandeln können, erlangen Elektromotoren Ausbeuten von bis zu 80 Prozent.²⁷ Das macht sich schon jetzt in den variablen Kosten pro Kilometer bemerkbar (siehe **Abbildung 3**).

Allerdings ist die Beschaffung der für die Batterien benötigten Stoffe zum Teil mit hoher Umweltbelastung verbunden. Auch sind die für das Laden benötigten Zeitintervalle deutlich länger und die durchschnittliche Reichweite deutlich kürzer als bei konventionellen Verbrennungsmotoren. Das enorme wirtschaftliche und politische Interesse an dieser Technologie hat auch hier die Forschungs- und Entwicklungsbudgets prall gefüllt. Daher sind auch in dieser Industrie innovative Entwicklungen zu erwarten, die zukünftig die Technologieadaption noch weiter fördern dürften. Wohlgemerkt: Batterieelektrische Antriebe sind nicht die einzige Möglichkeit, um elektrischen Strom für die eigenen Mobilitätsinteressen zu verwenden. Sektion **3.3.3.** behandelt die Optionen, die Wasserstoff in diesem Zusammenhang bietet. Die hier geschilderten Technologien zeigen die offensichtlichsten und naheliegendsten bzw. niedrigschwelligsten Möglichkeiten, mit denen Privatleute an der Sektorkopplung beteiligt werden können. Darüber hinaus sind natürlich auch weitere Anwendungsszenarien denkbar.

In jedem Fall bedeutet allerdings eine zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs, dass die Strombedarfe der Haushalte deutlich steigen. Wie in Sektion **2.2.** beschrieben, ist daher ein massiver Ausbau der öffentlichen Leitungsinfrastruktur vonnöten – insbesondere auch im Niederspannungsnetz. Erst dadurch können die benötigten Energiemengen an die Haushalte geliefert werden. Davon abgesehen müsste das Angebot an Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge deutlich ausgebaut werden. Bislang werden viele potentielle Nutzer von E-Autos von mangelnden Lademöglichkeiten abgeschreckt. Das gilt insbesondere auch für grenzüberschreitende Fahrten innerhalb der Europäischen Union. Um den Verkehrssektor daher auf einen batterieelektrischen Antriebsstrang umzustellen, müsste zunächst diese Herausforderung angegangen werden.

2.3.2. Industrielle Anwendungen

Dass in einer Industrienation wie Deutschland ein nicht unwesentlicher Anteil des Treibhausgasausstoßes auf die Industrie zurückzuführen ist, ist nicht verwunderlich. Rund acht Prozent der Emissionen konnten im Jahr 2020 direkt der Industrie zugeschrieben werden.²⁸ Dabei sind weitere Emissionen der Industrie, die indirekt auf den Energiemix der Energiewirtschaft zurückzuführen sind, nicht eingepreist. Insgesamt nutzt die Industrie daher sogar knapp vierzig Prozent der Primärenergie in Deutschland.²⁹ Einige dieser Anwendungsbereiche, die bislang mit fossilen Energien betrieben wurden, können durch elektrischen Strom ersetzt werden. Insbesondere, was die Mobilität und Raumwärme in den Industriekomplexen anbelangt, können die selben Technologien wie in Privathaushalten angewandt werden.

Jenseits davon kann ein Großteil der industriellen Hitzebedarfe durch Elektrifizierung bedient werden – diese machen rund 66 Prozent der insgesamt benötigten Primärenergie der Industrie aus und sind bis dato für über 20 Prozent der Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich.³⁰ In Zukunft könnten Hochtemperatur- und Höchsttemperaturwärmepumpen Prozesstemperaturen von bis zu 200° Celsius erreichen. Rund ein Drittel der bislang für Prozesswärme benötigten Energie fließt in Prozesse in diesem Temperaturbereich. Wie auch in Privathaushalten können Wärmepumpen dabei besonders hohe Effizienzgrade erreichen, weshalb mit dieser Technologie insgesamt deutlich weniger Primärenergie benötigt werden würde als bei den konventionellen, fossilen Methoden. Im Bereich über 200° Celsius können, bis zur Schwelle von ungefähr 500° Celsius, Elektrodenkessel benutzt werden. Diese benötigen einen ähnlichen Primärenergieeinsatz wie konventionelle Verfahren, kommen aber ohne klimaschädliche Emissionen aus. Höhere Temperaturbedarfe werden in Sektion **3.3.2.** behandelt.

²⁶ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#minderungsziele-der-bundesregierung>

²⁷ <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/effizienz-und-kosten>

²⁸ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#energie-stationar>

²⁹ https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie.pdf?__blob=publicationFile&v=8

³⁰ https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021-05_IND_DE-P4Heat/2022-07-07_Praesentation_Webinar_Power-2-Heat.pdf

3. Wasserstoff

Wasserstoff ist das älteste und leichteste Element des Universums und ist direkt mit dem Urknall entstanden.³¹ Es macht rund neunzig Prozent aller Materie im Universum aus. Auf der Erde ist der Stoff allerdings weit weniger häufig vorhanden. Hier besteht nur etwa 0,12 Prozent der Masse insgesamt aus Wasserstoff. Der größte Anteil ist dabei in Verbindung mit Sauerstoff in Form von Wasser gebunden.³² Der Menschheit ist nur auf Kohlenwasserstoff basiertes Leben bekannt – folglich ist Wasserstoff in vielerlei Hinsicht einer der essenziellsten Bestandteile unserer Existenz. Aber auch auf weniger „existenzieller“ Ebene hat Wasserstoff schon jetzt eine hohe Bedeutung in vielen industriellen Anwendungen. Zu nennen sind in erster Linie die Düngemittelindustrie, aber auch in der Herstellung anderer chemischer Produkte sowie zur Raffinierung von Mineralölprodukten wird Wasserstoff schon heute in großem Umfang eingesetzt.³³ Mit neuen, innovativen Technologien könnte die Rolle von Wasserstoff für das moderne Wirtschaften nochmals exponentiell gesteigert werden – und das, ohne das Klima dabei zu belasten.

3.1. Wasserstoffförderung

Bislang wird Wasserstoff in erster Linie aus fossilen Quellen gefördert – vor allem aus Erdgas. Bei diesem Prozess werden Treibhausgase freigesetzt.³⁴ Daher ist dieser konventionell geförderte Wasserstoff selbstverständlich nicht klimaneutral. Warum also kann Wasserstoff eine Klimaschutzinnovation darstellen?

Wieder lautet das Stichwort: Sektorkopplung. Wie beschrieben ist der größte Teil des auf der Erde verfügbaren Wasserstoffs in Wasser gebunden. Diese Bindung kann vergleichsweise einfach mit elektrischem Strom getrennt werden. Auf diese Weise können die beiden Komponenten, also Wasserstoff und Sauerstoff, separat aufgefangen werden. Letztlich wird die elektrische Energie aus dem Strom in chemische Energie in Form von hochreaktivem Wasserstoff umgewandelt. Dieser Prozess heißt Elektrolyse.³⁵ Die chemische Energie kann dann in den unterschiedlichsten, zum Teil auch konventionellen, Anwendungsfeldern eingesetzt werden. Daher spricht man auch hier von Sektorkopplung, da indirekt elektrischer Strom als Ausgangsenergieform genutzt wurde, um die Energie anderweitig benutzen zu können – im Fachjargon auch als *Power-to-Gas* bekannt.³⁶ Wenn der benötigte Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammt, ist von *grünem Wasserstoff* die Rede. Bei dem ebenfalls klimaneutralen, mit Atomstrom gewonnenen Wasserstoff spricht man hingegen von *gelbem Wasserstoff*. Der Einfachheit halber, ist in der Fol-

ge von Wasserstoff die Rede. Hierbei ist aber explizit klimaneutral gewonnener – also grüner oder gelber – Wasserstoff gemeint.

Der gewonnene Wasserstoff kann dann entweder als Gas oder durch Kälte verflüssigt transportiert oder eingelagert werden – beides ist leider relativ kompliziert und energieaufwändig. Alternativ kann der Wasserstoff auch durch eine chemische Weiterverwertung, unter Verwendung von Kohlenstoffdioxid, in synthetische Kraftstoffe umgewandelt werden. Hier spricht man von *Power to X* – da die Anwendungsbereiche letztlich unbegrenzt sind. Diese Kraftstoffe – auch *E-Fuels* genannt – haben dann den Vorteil, dass sie ohne größere Anpassungen Erdölderivate ersetzen können.³⁷ Sollte der für die Elektrolyse genutzte Strom aus klimaneutralen Quellen stammen, ist der gewonnene Wasserstoff ebenfalls klimaneutral. Dadurch hat auch der spätere Einsatz des Wasserstoffs oder seiner Folgeprodukte keine negativen Auswirkungen auf das Klima. Dabei ist es prinzipiell irrelevant, wo dieser klimaneutrale Strom gewonnen wurde. Denn Wasserstoff kann in besonders dichten Tanks und unter hohem Druck bzw. äußerst niedrigen Temperaturen auch gelagert und verschifft werden. Dadurch können flächen- und sonnen- bzw. windreiche Nationen aus dem Handel mit nachhaltigem Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen ein profitables Geschäftsfeld erschließen. Dies könnte insbesondere in einigen Ländern Afrikas einen zusätzlichen Entwicklungsschub für die heimische Wirtschaft entfachen. Gleichzeitig könnte ein so entstehender internationaler Handel mit klimaneutralem Wasserstoff die Energiepreise in den Industrienationen auf einem tragbaren Niveau halten und somit den Klimaschutz fördern, ohne die Wirtschaft zu ersticken.

3.2. Herausforderungen

Die geschilderte Lösung wirkt zu gut um wahr zu sein – und das ist sie auch. Das Problem an der Sache: Die für die Elektrolyse bzw. nachgelagerten Wertschöpfungsschritte aufgewandte Energie übersteigt die im Wasserstoff oder E-Fuel gespeicherte Energie zum Teil um ein Vielfaches. Unter optimalen Laborbedingungen könnten Elektrolyseure einen energetischen Wirkungsgrad von bis zu 70 Prozent erreichen – das heißt 70 Prozent der eingesetzten elektrischen Energie wird in Wasserstoffäquivalenten verfügbar.³⁸ Allein, diese Technologie ist noch nicht größer skaliert im Einsatz. Abhängig von den Verfahren und den nachstehenden Veredelungsstufen können beispielsweise bei der Verwendung von synthetischen Kraftstoffen in einem konventionellen PKW nur 10 bis 15 Prozent der zunächst aufgebrauchten elektrischen Energie zur Bedienung der Mobilitätsansprüche eingesetzt werden – das heißt, bis zu 90 Prozent der Energie gehen im

³¹ <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/hadronen-und-kernphysik/elemententstehung-und-erzeugung/entstehung-der-elemente/>

³² <http://www.wbzu.de/seminare/infopool/infopool-wasserstoff>

³³ <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff/wasserstoff-anwendungen>

³⁴ <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/herstellung-von-wasserstoff>

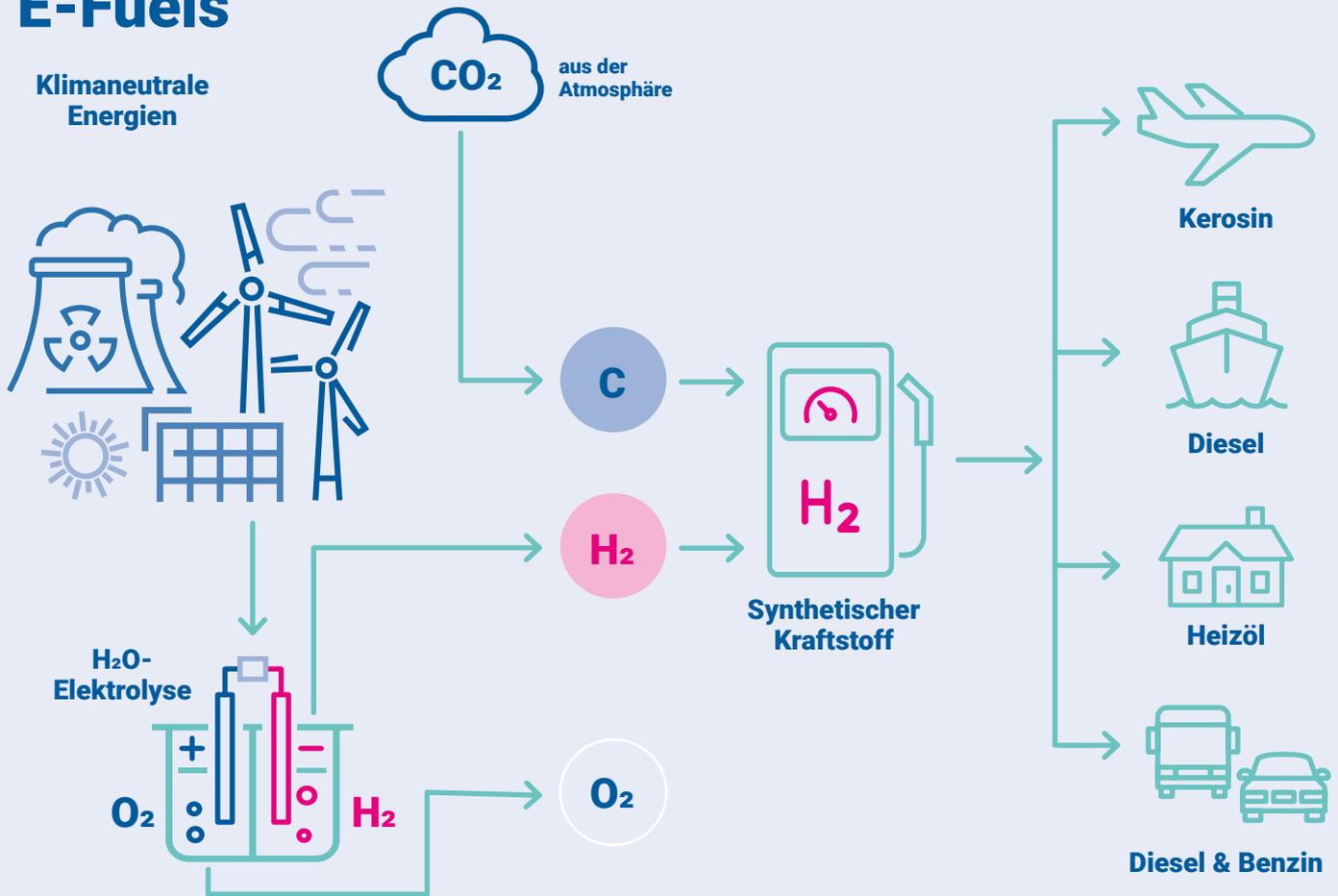
³⁵ <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/herstellung/elektrolyse-von-wasser/>

³⁶ <https://www.energieforschung.de/spotlights/wasserstoff-sektorkopplung>

³⁷ <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>

³⁸ <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html>

E-Fuels



Grafik: Bsd555, Tasha Vector, Newarmyart, fonikum via Getty Images

Laufe der Verfahren „verloren“.³⁹ Während grundsätzlich davon auszugehen ist, dass durch fortlaufende Verbesserungen und Weiterentwicklungen die zugrundeliegende Technologie effizienter und daher auch anwendungsfreundlicher wird, sind gewisse physikalische Grenzen dabei trotzdem nicht von der Hand zu weisen.

Grundsätzlich gilt: Je häufiger die Energieform umgewandelt wird, desto geringer ist der letztlich erzielte energetische Wirkungsgrad. An diesen physikalischen Gegebenheiten werden auch Innovation und Fortschritt nichts Grundlegendes ändern können. Daher muss entweder das Energieangebot immens hoch sein, sodass die niedrige Effizienz verkraftbar wird – noch sprechen wirtschaftliche Argumente gegen diesen Fall. Oder aber die Einsatzgebiete des Wasserstoffs, respektive der daraus raffinierten Folgeprodukte, werden auf Grund der Kostenstruktur vermutlich wohl bemessen bleiben. Das hätte zur Folge, dass wo möglich, die direkte Elektrifizierung von Prozessen, wie in Sektion 2. beschrieben, Vorrang vor einer Wasserstofflösung erhalten würde.

Eine weitere Herausforderung besteht im Transport und der Speicherung des Wasserstoffs. Wasserstoff ist das kleinste Element – dadurch ist es sehr flüchtig. Eine einfache Wertenutzung der konventionellen, auf Erdgas ausgelegten Infrastruktur ist daher nicht ohne weiteres möglich. Die bestehen-

den Pipelines, Pumpanlagen und Speicher müssten dafür erst ertüchtigt oder durch Neukonzeption ersetzt werden. Hinzu kommt ein enormes Sicherheitsrisiko, das von einer leckgeschlagenen Wasserstoffleitung ausgeht. Die notwendige Mindestzündenergie, um ein Wasserstoff-Luft-Gemisch zu zünden, ist sehr gering. Außerdem ist die Flammgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, mit der sich die Flammenfront ausbreitet, bei einem Wasserstoff-Luft-Gemisch etwa achtmal höher als etwa bei einem Erdgas-Luft-Gemisch.⁴⁰ Daher birgt die weitreichende und dezentrale Etablierung eines Wasserstoffnetzwerkes gehörige Sicherheitsrisiken, die durch technische Maßnahmen und intensive Wartungszyklen jedoch minimiert werden können.

3.3. Anwendungsszenarien

Es vergeht kaum ein Tag, an dem nicht innovative und wasserstoffbasierte Lösungen vorgestellt werden, die den Klimafußabdruck einzelner Prozesse oder gar ganzer Branchen signifikant verringern könnten. Ob in der Stahlverhüttung oder als Flugzeugtreibstoff – Wasserstoff könnte im Prinzip fossile Energieträger in Gänze ersetzen und somit auch auf innovative Weise den Ausstoß von klimaschädlichen Treibhausgasen verhindern.

³⁹ <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>

⁴⁰ <https://www.chemietechnik.de/sicherheit-umwelt/herausforderungen-beim-umgang-mit-gruenem-wasserstoff-32-521.html>

3.3.1. Netzstabilisierung

Eine besonders hervorzuhebende Rolle, die Wasserstoff einnehmen könnte, ist das Abmildern von Leistungsspitzen bzw. die Funktion als Stabilitätsgarant für die Netzinfrastruktur. Denn um das Stromnetz stabil zu halten, muss eine konstante Spannung gehalten werden. Das heißt, übermäßige Stromspeisungen oder aber spontane Einbrüche der nachgefragten Leistung können das Spannungsniveau verändern. Übermäßige Abweichungen können das Stromsystem zum Kollaps bringen und die Infrastruktur beschädigen. Daher geht von der in Sektion 2.1.1. beschriebenen Volatilität der erneuerbaren Energien bei unzureichendem Management durchaus ein nicht unwesentliches Risiko für die Netzstabilität aus.

Einen Einbruch gilt es zu verhindern: Zu besonders sonnen- oder windreichen Zeiten könnten großskalierte Elektrolyseure grünen Wasserstoff mit dem überschüssigen Strom herstellen. Wenn dann zu einem späteren Zeitpunkt Bedarf an zusätzlicher Leistung besteht, kann der gewonnene Wasserstoff durch Brennstoffzellen in elektrische Energie umgewandelt werden. Der zusätzliche Bedarf könnte auch mit importiertem Wasserstoff gedeckt werden. Der Wirkungsgrad von stationären Brennstoffzellen liegt aktuell bei ca. 60 Prozent.⁴¹ Daher geht zwischen der Elektrolyse und der Wiederverstromung ein nicht unwesentlicher Teil der Energie „verloren“. Und dennoch stellt dieser Ansatz wahrscheinlich ein wichtiges Element in der klimaneutralen Umstellung dar. Denn Wasserstoff kann, im Vergleich zu Strom, längerfristig gelagert werden. Dadurch erlaubt die energetische Speicherung in Form von Wasserstoff auch eine Überbrückung der kalten und dunklen Wintermonate.

Hinzu kommt, dass eine Wasserstoffrückverstromung ähnlich wie bei der in Sektion 2.2. beschriebenen internationalen Vernetzung neben dem Stromnetz auch den Strommarkt stabilisiert. Preisschwankungen werden ausgeglichen und Einkünfte aus erneuerbaren Energien besser vorhersehbar. Das kann nicht zuletzt auch zusätzliche privatwirtschaftliche Investitionen in den Energiesektor anregen. Ein weiterer Vorteil bei diesem Ansatz ist, dass im Gegensatz zu den bislang eingesetzten Gaskraftwerken, die in Zeiten von Knappheit in der Stromerzeugung zugeschaltet werden, keine Treibhausgase, sondern nur Wasser entsteht. Denn in der Brennstoffzelle wird der Wasserstoff, unter Abgabe von elektrischer Spannung, mit Sauerstoff verbunden. Dabei wird Strom zur Verfügung gestellt und Wasser entsteht.

Zukünftige Innovation und Forschung werden die Wirkungsgrade von Elektrolyseuren, Brennstoffzellen sowie die Verlusten von Speichertanks vermutlich weiter verbessern. Dadurch wird die beschriebene Technologie wirtschaftlicher.

3.3.2. Industrielle Anwendung

Eine direkte Elektrifizierung ist in vielen Anwendungsgebieten und Industrieprozessen die wirtschaftlichste und energetisch sinnvollste Lösung. Diese Faustregel gilt auch für einen Teil der industriellen Wärmebedarfe. Insbesondere Prozesse, die

Temperaturen zwischen Raumtemperatur und 500° Celsius benötigen, können äußerst effizient durch direkte Elektrifizierung umgesetzt werden, wie in Sektion 2.3.2. erörtert. Und dennoch: Vor dem Hintergrund der in vielen Industrien deutlich höheren benötigten Temperaturen bedarf es anderer Ansätze.

Beispielsweise verbrennen die Papier-, Glas- und Porzellanindustrien bislang Erdgas, um ihre Produkte herzustellen – derartige Prozesse könnten zukünftig durch Wasserstoff ersetzt werden.⁴² Denn auch Wasserstoff kann unter gegebenen Sicherheitsmaßnahmen „thermisch genutzt“ – also kontrolliert verbrannt werden. Die dafür benötigten Brenner werden durch Forschungs- und Entwicklungsprojekte stetig effizienter und verbessern dadurch ihren Wirkungsgrad.⁴³ Nichtsdestotrotz, der energetische Wirkungsgrad der thermischen Nutzung von Wasserstoff ist nicht optimal. Etwa eineinhalb- bis zweimal so viel elektrische Energie muss aufgewendet werden, wie letztlich thermisch zu Verfügung steht.⁴⁴

Auch bei der Verbrennung reagiert der Wasserstoff mit Sauerstoff und Wasser entsteht. Wieder werden keine Treibhausgase freigesetzt. So kann Wasserstoff als klimaneutraler Energieträger für viele Industrien, in denen Prozesswärme benötigt wird, herangezogen werden. Da Prozesswärme mit rund 66 Prozent den größten Posten in den Energiebedarfen der deutschen Industriebetriebe ausmacht, bietet Wasserstoff ein gewaltiges Potential für innovativen Klimaschutz.⁴⁵

Ein weiteres mögliches industrielles Anwendungsfeld sind Prozesse, bei denen bislang eine fossile Energiequelle zur Reduktion – also zur Reaktion mit Sauerstoff – herangezogen wurde. Beispielsweise in der konventionellen Eisenherstellung wird Kohlenstoff zu oxidiertem Eisen hinzugefügt – dadurch entsteht zum einen das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid und zum anderen Stahl. Wenn stattdessen Wasserstoff hinzugeführt wird, bindet sich der Sauerstoff mit dem Wasserstoff zu Wasser – und reines Eisen bleibt übrig.⁴⁶ Daher bietet Wasserstoff auch ein immenses Potential, Sektoren wie die Stahl- und Chemieindustrie zu dekarbonisieren, in denen bislang fossile Kohlenstoffderivate für die Reduktion herangezogen wurden. Und doch: Die Umstellung dieser Industrien ist höchst kostenintensiv. Nichtsdestotrotz werden diese innovativen Methoden schon in Pilotanlagen getestet und für die weitergreifende Anwendung erprobt. Das ist auch essenziell – ist doch allein der Stahlverhüttung knapp ein Viertel der industriellen Treibhausgasemissionen in der Welt zuzuschreiben.⁴⁷

Ähnlich ausschlaggebend ist der Klimateffekt der Zement-, genauer gesagt Klinkerherstellung. Mit rund einem Fünftel des Klimafußabdruckes der weltweiten Industrie ist diese Branche auch besonders geeignet für modernen und innovations-

⁴² <https://www.zfk.de/energie/gas/stadtwerke-mainz-papierfabrik-steigt-auf-gruenen-wasserstoff-um>

⁴³ <https://www.tu-chemnitz.de/tu/pressestelle/aktuell/10686>

⁴⁴ https://static.agora-energiawende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021-05_IND_DE-P4Heat/2022-07-07_Praesentation_Webinar_Power-2-Heat.pdf

⁴⁵ https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2013/Kurzstudie_Abwaermenutzung.pdf

⁴⁶ <https://www.bdew.de/verband/magazin-2050/wasserstoff-statt-kohle-der-stahl-der-zukunft-ist-klimafreundlich/>

⁴⁷ <https://energiwinde.orsted.de/trends-technik/klimaneutrale-industrie-zement-stahl-chemie>

⁴¹ <https://www.bosch.com/de/stories/stationaere-brennstoffzellen/>

geleiteten Klimaschutz durch Wasserstoff.⁴⁸ Die Krux dabei: Aufgrund von chemischen Prozessen setzt die konventionelle Zementherstellung zwangsläufig Treibhausgase frei. In Pilotprojekten werden daher unterschiedliche innovative Herangehensweisen untersucht, von denen man sich perspektivisch eine praktikable und wirtschaftlich umsetzbare Alternative zu den bislang verwendeten Verfahren erhofft. Dabei haben alle vorgeschlagenen Verfahren eine Sache gemein: Wasserstoff ist ein wesentlicher Bestandteil zur Lösung und könnte so helfen, den Klimaeffekt der Zement- und Betonindustrien zukünftig zu verringern und somit auch den Klimafußabdruck des Baugewerbes wesentlich zu reduzieren. Dabei werden allerdings gewisse Emissionen auch unter Wasserstoffnutzung nicht zu vermeiden sein – daher ist eine Ausweitung der *Carbon Capture*-Technologie für manche Sektoren die einzige Möglichkeit, die Klimaneutralität zu erreichen.

Ungeachtet dessen: Die Anwendungsmöglichkeiten von klimaneutral gewonnenem Wasserstoff sind nahezu unbegrenzt. Deutlich eingeschränkter hingegen wird die Verfügbarkeit des benötigten Wasserstoffes sein – besonders in der Anfangsphase der Umstellung. Daher wird ein internationaler Handel mit erneuerbarem Wasserstoff, wie in Sektion 3.1. angeschnitten, von essenzieller Bedeutung für die Umstellung ganzer Industriezweige sein.

3.3.3. Mobilität

Auch in Sachen klimafreundliche Mobilität bietet Wasserstoff ein gewaltiges Potential. Schon jetzt gibt es namhafte Fahrzeughersteller, die Brennstoffzellen in ihren PKWs verbauen. Der so generierte Strom betreibt einen Elektromotor, der dann wiederum das Fahrzeug antreibt. Diese Technologie erlaubt, im Vergleich zu den batterieelektrischen Pendants, deutlich kürzere Tankzyklen. Außerdem müssten auch die Niederspannungsnetze, die die Versorgung der Haushalte sicherstellen, weniger stark ertüchtigt werden – was eine Ersparnis auf der infrastrukturellen Seite zur Folge hätte. So müsste nur die Infrastruktur der Tankstellen ausgetauscht werden. Gegen eine mobile Nutzung von Brennstoffzellen in Automobilen spricht hingegen der niedrigere Wirkungsgrad, verglichen mit batterieelektrischen Lösungen. Außerdem sind bislang die Anschaffungskosten für wasserstoffbetriebene Automobile deutlich höher als beispielsweise die von konventionellen Verbrennern oder aber batterieelektrischen Fahrzeugen.⁴⁹ Auch hier ist aber angesichts zu erwartender technologischer Fortschritte von Kostenreduktionen auszugehen.

PKW-gebundener Verkehr ist aber längst nicht das einzige Anwendungsszenario, bei dem man sich eine Einbindung von Brennstoffzellen vorstellen kann. Schon jetzt gibt es in manchen Teilstrecken auf dem deutschen Schienensystem Hybridzüge. Diese nutzen, wo vorhanden, Strom aus Hochleitungen – können aber, wo diese nicht vorhanden sind, auf einen Wasserstoffbetrieb umstellen.⁵⁰ So kann auch der Schienenbetrieb, abhängig von dem verwendeten Energiemix, durch innovative Methoden das Klima schützen.

Wie in Sektion 3.1. beschrieben, besteht jenseits des direkten Einsatzes von Wasserstoff auch die Möglichkeit, mit petrochemischen Verfahren konventionelle Kraftstoffe unter Einsatz von klimaneutralem Wasserstoff nachzubauen. Die Verwendung dieser Kraftstoffe trägt dann nicht zur Erwärmung des Klimas bei. Ein weiterer Vorteil der *E-Fuels* ist, dass sie im Vergleich zu Batterien oder einfachem Wasserstoff über eine deutlich höhere Energiedichte verfügen. Das ermöglicht, dass längere Strecken durch vergleichsweise leichtere Fahrzeuge zurückgelegt werden können. Außerdem ermöglichen synthetische Kraftstoffe ein Festhalten am infrastrukturellen Status quo. Bestehende Tankstellen könnten wie gewohnt mit flüssigem Treibstoff versorgt werden. Auch wären nur unwesentliche Umstellungen bei den Herstellern vonnöten. Ferner könnte man an den technologischen Fortschritten, die in über 100 Jahren verbrennungsmotorgebundener Mobilität erreicht worden sind, anknüpfen.⁵¹ Gegen eine breitere Anwendung dieser Technologie spricht allerdings der deutlich geringere energetische Wirkungsgrad. Insbesondere in infrastrukturell erschlossenen Regionen überwiegen insbesondere beim PKW-Individualverkehr bislang die energetischen Vorteile von batterieelektrischen Antriebssträngen. Durch Innovation, technologische Entwicklung und einen massiven Ausbau der Wasserstoff- und Raffinerieinfrastruktur können diese Nachteile zukünftig wahrscheinlich zum Teil ausgeglichen werden. Allerdings spricht aktuell nicht viel dafür, dass *E-Fuels* konventionelle, fossile Treibstoffe eins zu eins ersetzen werden – zumindest nicht im Individualverkehr. Viel eher wird deren Verwendung einigen wichtigen Nischen vorbehalten sein. Unter anderem ist beispielsweise eine Anwendung im Gelände und der Landwirtschaft, bei militärischem Gerät oder aber in Oldtimern und im Motorsport denkbar.

Aber dennoch befürworten Mobilitätsexperten eine großflächige Anwendung von *E-Fuels* in anderen Anwendungsbereichen. Zu nennen sind vor allem der Luft- und Seeverkehr. Hier spricht insbesondere die hohe Energiedichte der synthetischen Kraftstoffe für deren Anwendung. Um die notwendige Menge an Wasserstoff für einen Langstreckenflug mitzuführen, müssten die Tanks deutlich größer werden. Gegen Batterien spricht das Gewicht, dass diese innehaben müssten, um die für einen Langstreckenflug notwendige Energie zu speichern. Ähnlich verhält es sich beim Lasten- und Personenverkehr zur See. Daher sind besonders die Luft- und Seefahrtbranche von technologischen Entwicklungen, einer Verfeinerung der Prozesse sowie einem Ausbau der Raffineriekapazitäten abhängig. Durch die geschilderten innovativen Herangehensweisen können zukünftig auch diese Sektoren klimaneutral und nachhaltig agieren und dabei trotzdem globale Güterflüsse und die internationale Freizügigkeit aufrecht erhalten.⁵²

⁴⁸ <https://energiewinde.orsted.de/trends-technik/klimaneutrale-industrie-zement-stahlchemie>

⁴⁹ <https://www.umschalten.de/wasserstoffautos-im-test/>

⁵⁰ <https://www.bayern.de/wasserstoffantrieb-im-schienenverkehr/>

⁵¹ <https://www.autobild.de/artikel/efuels-verbrenner-synthetische-kraftstoffe-preis-tanken-nachteile-oeko-sprit-20574151.html>

⁵² <https://background.tagesspiegel.de/mobilitaet/wir-brauchen-e-fuels-aber-nicht-im-pkw-tank>

4. Effizienzsteigerung

Die bislang behandelten Innovationen setzen einen grundlegenden Paradigmenwechsel voraus. In anderen Worten, eine Abkehr vom Einsatz von fossilen Energieträgern, zugunsten von klimaneutralen Energieformen und Sektorkopplung. Während eine derartige Umstellung zweifelsohne notwendig sein wird, um ein tatsächlich klimaneutrales Wirtschaftsgefüge zu erlauben, können auch weitere Effizienzsteigerungen die Nachfrage nach Primärenergie verringern. Das kann zum einen Kostenvorteile für die entsprechenden Unternehmen zur Folge haben, zum anderen aber auch den Gesamtenergiebedarf merklich senken. Daher lohnt es sich auch über innovative Methoden zur Steigerung der Effizienz nachzudenken.

Ein bekanntes Beispiel in diesem Zusammenhang sind zeitgemäße Leuchtmittel. So benötigen moderne LED-Leuchten im Vergleich zu herkömmlichen Glühbirnen etwa ein Zehntel des Energieeinsatzes, um dieselbe Helligkeit zu erreichen.⁵³ Angesichts der rund 130 Terrawatt, die allein das Gewerbe in Deutschland bislang für Beleuchtung verbraucht, besteht hier ein gigantisches Verbesserungspotential – denn nur etwa 15 Prozent der Betriebe nutzen aktuell konsequent LED-Leuchten.⁵⁴ Dieses Beispiel erläutert, wie drastisch innovative und effizientere Technologien den Energiebedarf senken können. Doch es gibt noch eine Vielzahl an weiteren Potentialen, die gehoben werden können. Zwei mögliche Treiber werden in den kommenden Sektionen vorgestellt.

4.1. Wärme

Wie in Sektion 3.3.2. beschrieben, ist ein wesentlicher Anteil des Energieverbrauches in den Industriebetrieben auf die Prozesswärme zurückzuführen. Dabei führen effizientere Prozesse dazu, dass immer weniger überschüssige Abwärme entsteht. Bislang werden wesentliche Teile dieser Abwärme nicht zurückgewonnen oder zur Beheizung von Gebäuden genutzt. Durch innovative Rückgewinnungstechnologien oder eine Integration in Fern- und Nahwärmenetze könnten diese Energieüberschüsse zukünftig nutzbar gemacht werden. Besondere Chancen zeigen sich dabei in Branchen wie der metallverarbeitenden Industrie und dem Hüttenwesen.⁵⁵ Beispielsweise ist die Aluminiumproduktion ein Industriezweig, der sehr viel, zum Großteil ungenutzte Abwärme freisetzt. Hier liegen enorme Potentiale, um etwa durch eine Integration ins Wärmenetz einen Teil der Abwärme nutzbar zu machen. Ein Ausbau des Wärmenetzes ermöglicht auch die stärkere Nutzung der Geothermie. Bislang wird in Deutschland nur rund ein Prozent des geothermischen Potentials genutzt. Fern- und Nahwärmenetze könnten die Nutzung dieser nachhaltigen Wärmequelle insbesondere im dicht besiedelten Raum erleichtern.

⁵³ https://www.artylux.de/Vergleichstabellen-Lumen-und-Watt_-34.html

⁵⁴ <https://www.forschung-und-wissen.de/nachrichten/oekonomie/grosses-energieein-sparpotenzial-durch-led-lampen-13376574>

⁵⁵ <https://ee-ip.org/de/article/wie-die-wiederverwendung-von-abwaerme-aluminium-einen-schritt-naeher-zu-einer-grueeneren-industrie-bringen-kann-5849>

Sowohl Erd- als auch Abwärme könnten außerdem genutzt werden, um Turbinen anzutreiben und somit Energie in Form von Elektrizität zurückzugewinnen.⁵⁶ Die Möglichkeiten zur sektorübergreifenden Effizienzsteigerung sind dabei enorm. Jenseits der zu erwartenden, positiven Auswirkung auf das Klima lohnen sich Investitionen in die zugrundeliegenden Innovationen auch aufgrund der Verringerung der Betriebskosten. Insbesondere wenn die längerfristigen Energiepreise sich den Prognosen folgend auf einem stabilen aber hohen Niveau einpendeln.⁵⁷

Eine weitere Art, mit der die Effizienz im Wärmesektor gesteigert werden könnte, sind Fortschritte in der energetischen Sanierung im Gebäudesektor. Durch innovative thermische Isolierung und moderne Fenster können die Heiz- und Kühlbedarfe in Gebäuden deutlich verringert werden. Beispielsweise isolieren moderne dreifachverglaste Fenster einen Raum dreibis zehnmal so gut wie einfache Scheiben.⁵⁸ Dadurch sinkt wiederum auch die benötigte Energiemenge, was sich positiv auf die Betriebskosten auswirkt. Während moderne Bauten oft schon sehr hohe Energiestandards erfüllen, gilt das noch lange nicht für den Altbestand. Aber auch dort können moderne Bau- und Isolationsstoffe die energetische Effizienz steigern.⁵⁹ Durch technologische Innovationen und einen stark wachsenden Markt für energetische Sanierungen sind die Materialkosten in manchen Bereichen bereits stark gesunken. Allein der Mangel an ausgebildetem Fachpersonal verhindert bislang, dass die Kostensenkungen für energetische Sanierungen an die Gebäudeeigentümer weitergereicht werden können. Auch Langfristwärmespeichern könnte eine wichtige Rolle im Kontext des Klimaschutzes zukommen. Prinzipiell ermöglichen diese Technologien das Abgreifen und Speichern von bislang ungenutzten Energiepotentialen. Beispielsweise könnten solche Wärmespeicher genutzt werden, um überschüssige Prozesswärme oder aber die Restwärme von Abwässern und nicht zuletzt auch die Hitze des Sommers in die kälteren Jahreszeiten zu übertragen.⁶⁰ Diesbezüglich gibt es eine Vielzahl von Pilotprojekten, jeweils mit unterschiedlichen Herangehensweisen und Zielsetzungen. Alle haben gemein, dass sie enorme Effizienzsteigerungen versprechen und somit auch die benötigte Menge an Primärenergie verringern können.

4.2. Digitalisierung

Bislang wurden in erster Linie analoge Methoden zur Verringerung des Klimateffektes thematisiert. Davon losgelöst versprechen digitale Ansätze enorme Effizienzsteigerungen in praktisch allen Anwendungsbereichen. Haushalte können bei-

⁵⁶ <https://ee-ip.org/de/article/wie-die-wiederverwendung-von-abwaerme-aluminium-einen-schritt-naeher-zu-einer-grueeneren-industrie-bringen-kann-5849>

⁵⁷ <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/co2-und-erdgaspreise-studie-strompreis-steigt-bis-2030-um-50-prozent/27170486.html>

⁵⁸ <https://heizung.de/heizung/wissen/fenstertausch-zweifach-oder-dreifachverglasung/>

⁵⁹ <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestehende-Immobilie/Energieeffizient-sanieren/>

⁶⁰ <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/forscher-entwickeln-waermespeicher-ohne-energieverlust-17657412.html>

spielsweise durch eine zunehmende Smarthome-Integration nicht nur die Lebensqualität der Bewohner durch ein exakt steuerbares Temperatur- und Beleuchtungsmanagement sowie durch die Synchronisation von Unterhaltungsangeboten aber auch Sicherheitsmaßnahmen steigern, sondern eben gleichzeitig auch unnötige Energieverbräuche verringern. Allein beim Heizungsmanagement lassen sich so schon jetzt Energiesparpotentiale zwischen 10 und 20 Prozent verwirklichen.⁶¹ Angesichts zu erwartender technischer Entwicklungen und der zunehmenden Sektorkopplung könnten die tatsächlichen Potentiale zukünftig sogar noch deutlich höher ausfallen.

Auch bei der Mobilität versprechen digitale Integration und zunehmende Automatisierung des Verkehrs enorme Potentiale, Energie und Emissionen einzusparen. Digitale Methoden können zum Beispiel im eigentlichen Verkehrsmanagement eine wichtige, klimaschützende Rolle einnehmen. Insbesondere in Städten sind statische, also konventionelle Verkehrsregeln ineffizient und zum Teil sogar gefährlich. Da ist es deutlich sinnvoller, wenn die Verkehrsführung dynamisch auf das Verkehrsaufkommen und andere Rahmenbedingungen reagiert.

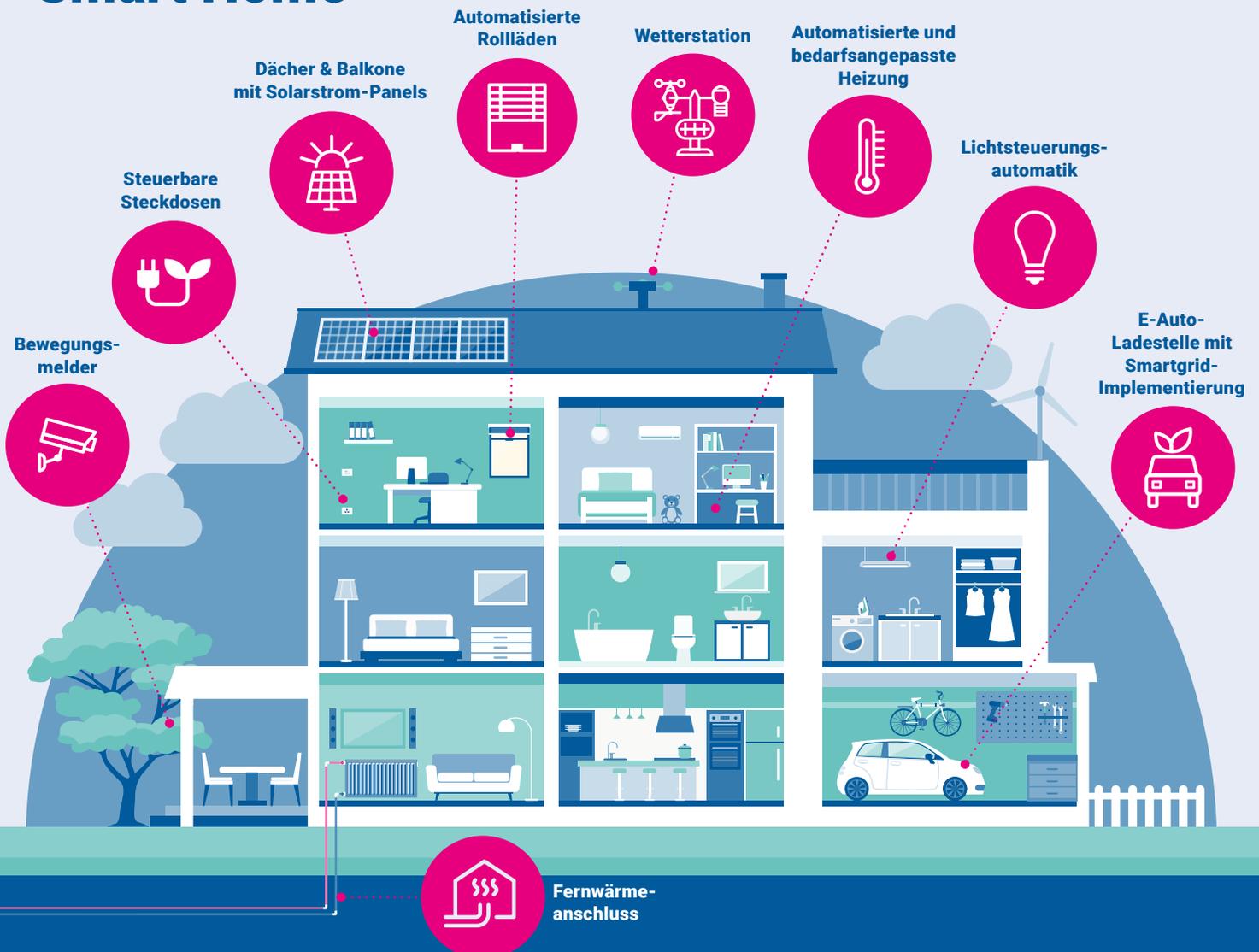
⁶¹ <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/sonderdrucke/bauphysik-gertis/6-einsparpotentiale-intelligente-heizungsregelung.pdf>

Intelligente Verkehrsleitsysteme (*Smart Traffic Management*) nutzen Daten zum aktuellen Verkehrsgeschehen, um geltende Verkehrsregeln – z.B. über dynamische Verkehrszeichen oder optimierte Ampelschaltungen – in Echtzeit anzupassen. So können Geschwindigkeitsbegrenzungen bei Staufahrt oder akuter Gefahrenlage verschärft werden, während solche Begrenzungen bei freien Straßen gelockert werden können. Zudem können den Verkehrsteilnehmenden in Echtzeit Informationen zum Verkehrsgeschehen übermittelt werden, die sie bei der Planung ihrer Fahrt einkalkulieren können. In Pittsburgh findet ein solches System nun Anwendung. Schon im ersten Jahr konnte allein durch die datengetriebene Optimierung der Ampelschaltung die durchschnittliche Reisezeit um etwa 25 Prozent und die Zahl der Verkehrsstaus um etwa 40 Prozent reduziert werden. Diese Einsparungen hatten eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 21 Prozent zur Folge.⁶² Ähnlich können digitale Parkleitsysteme – sogenanntes *Smart Parking* – die Parkplatzsuche vereinfachen und so immense Zeit- und Treibhausgaseinsparungen verursachen.⁶³

⁶² https://shop.freiheit.org/download/P2@1073/532140/PP_Int-Verkehr_final_220112.pdf

⁶³ <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/umweltschaedliche-parkplatzsuche-mit-smart-parking-koennten-bis-zu-900-000-tonnen-co2-eingespart-werden/25441374.html>

Smart Home



Bei gleichzeitiger, kontinuierlicher Elektrifizierung der Flottenstruktur können die Energiebedarfe und der Klimaeffekt der Mobilität somit durch innovative, digitale Methoden nachhaltig verringert werden. Als weiterer positiver Nebeneffekt verspricht der autonome Verkehr einen deutlichen Rückgang der Verkehrsunfälle und verringertes Stauaufkommen.⁶⁴

Selbstredend bietet eine digitale Integration auch im Industrie- und Energiesektor enorme Chancen zur Effizienzsteigerung. Ein konstanter Informationsaustausch zwischen Energieversorgern, Smarthomesystemen und digitalen Infrastrukturen in der Industrie erlaubt ein innovatives Energiebedarfsmanagement. So können Energiebedarfe mit niedriger Priorisierung und geringer Zeitrelevanz in Zeitintervalle verschoben werden, in denen das Angebot auf dem Strommarkt

⁶⁴ <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccn/2019/energie-treibhausgaswirkungen-vernetztes-fahren.pdf>

die Nachfrage sonst übersteigen würde. Somit wird abermals das Netz stabilisiert und auch die Preisschwankungen ebnen sich etwas ein.

Fakt ist: Die Wege, über die digitale Angebote den Energieverbrauch und den Klimaeffekt mancher Tätigkeiten verringern könnten, sind zahlreich. Und die Potentiale sind noch lange nicht alle gehoben. Allein durch umfangreiche Digitalisierungsinitiativen könnte Deutschland rund 34 Prozent der selbstauferlegten Emissionseinsparungen bis 2030 erreichen.⁶⁵ Neben der besagten Klimaeffekte hätte der digitale Fortschritt in vielen Fällen auch positive Auswirkungen auf die Lebensqualität und die Kostenstruktur – und würde somit auch auf mehrere komplementäre politische und gesellschaftliche Zielsetzungen einzahlen.

⁶⁵ <https://www.bitkom.org/Klimaschutz>

5. Handlungsempfehlungen

Die vorgestellten technischen und innovativen Lösungen können einen wichtigen Beitrag dazu leisten, den Ausstoß von Treibhausgasen und somit das Ausmaß der klimatischen Veränderungen zu beschränken. Dabei kann eine solche Umstellung, in der langen Frist, sogar eine Vielzahl an positiven Auswirkungen haben. Aber auch kurzfristig können zum Teil kleine Anpassungen große Einsparungen bedeuten. Der Leistungsdruck der Unternehmen und Haushalte ist aufgrund der aktuellen Energiepreise enorm – daher werden Investitionen in Energieeffizienz besonders attraktiv. Gleichzeitig führt das generell steigende Preisniveau aber auch zu großer Unsicherheit und finanziellen Sorgen. Dadurch werden insbesondere größere Umstellungen und Veränderungen, die sich nicht unmittelbar rentieren, auf die lange Bank geschoben. Um diese Potentiale trotzdem zu heben, müssen auch die politischen Rahmenbedingungen möglichst förderlich ausgestaltet sein.

5.1. Anreize schaffen

Die langfristigen prognostizierten Kosten des Klimawandels übersteigen die Kosten von Klimaschutzmaßnahmen um ein Vielfaches.⁶⁶ Das Problem dabei liegt, wie in Sektion 2. beschrieben, in der großen Zeitlücke zwischen dem Aufkommen der aufgrund des Klimawandels entstehenden Schäden und der wirtschaftlichen Vorteile, die der Status quo mit sich bringt. Die Schäden entstehen lange nach dem Ausstoß der Treibhausgase – daher werden sie für die Akteure weniger greifbar. Um als Unternehmen oder Bürger die langfristigen Auswirkungen der Emissionen einpreisen zu können, bedarf es wirtschaftlicher Mechanismen. Vor diesem Hintergrund hat sich der Emissionshandel als besonders effizient erwiesen. Die Grundidee ist denkbar einfach: Zunächst wird

eine akzeptable globale Erwärmungsgrenze festgelegt. Die Politik entscheidet daraufhin, basierend auf wissenschaftlichen Erkenntnissen, wie viele Treibhausgase noch maximal ausgestoßen werden dürfen – ohne besagte Grenze zu überschreiten. Anhand dieses Emissionsbudgets werden Zertifikate ausgegeben, die auf einem Markt gehandelt werden. Durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage erhalten diese Zertifikate einen Preis. Mit zunehmender Verknappung der Zertifikate steigt deren Preis und in der Konsequenz auch die Kosten der Emissionen.

Hierdurch werden echte Anreize zur Reduzierung von Treibhausgasen geschaffen. Stößt beispielsweise ein Industrieunternehmen weniger Treibhausgase aus, als ihm zustehen würden, kann es die übriggebliebenen Zertifikate an andere Marktteilnehmer verkaufen. Reichen dem Unternehmen die Berechtigungen hingegen nicht aus, muss der Ausstoß an Emissionen reduziert oder es müssen Zertifikate hinzugekauft werden. Der Emissionshandel sorgt somit für eine Marktlösung, die ein festgelegtes und politisch vorgegebenes Klimaziel mit minimalen volkswirtschaftlichen Kosten erreicht. Dabei schließt der Emissionshandel nicht zuletzt auch die zeitliche Lücke zwischen den entstehenden Schäden und deren Ursprung.

Mindestens genauso wichtig ist allerdings die innovative Dynamik in den Unternehmen, die solche marktwirtschaftlichen Anreize etabliert. So werden kurzfristig nicht nur die gesamtwirtschaftlichen Schäden minimiert, sondern enorme Wachstumspotentiale für die lange Frist gehoben. Und dennoch, insbesondere angesichts der aktuellen Unsicherheit, darf die Menge an Zertifikaten nicht unnötig verknappt werden. Denn die dadurch steigenden Preise für Emissionszertifikate würden in unserem noch weitestgehend fossilen Energiesystem zusätzliche Belastungen für die ohnehin an-

⁶⁶ <https://www.handelsblatt.com/politik/international/studie-oxfam-zu-wenig-klimaschutz-koennte-g7-staaten-billionen-euro-kosten/27261250.html>

gespannten Budgets der Verbraucherinnen und Verbraucher sowie vieler Unternehmen bedeuten.

5.2. Portfoliolösungen anstreben

Das Sprichwort, *man solle nicht alle Eier in einen Korb legen*, hat auch im Zusammenhang mit innovativem Klimaschutz seine Berechtigung. Im politischen und wirtschaftlichen Kontext spricht man dann zwar von Risikodiversifizierung, aber im Grunde genommen ist dasselbe gemeint: Einseitiges Investment in eine einzelne Technologie senkt zwar gegebenenfalls das insgesamt notwendige Investitionskapital. Im Falle eines Ausfalls dieser Technologie ist aber das gesamte Investment verloren und keine Alternative verfügbar. Hingegen empfiehlt es sich, auf eine Bandbreite an Technologien zu setzen, um im Falle einzelner Ausfälle nicht alternativlos dazustehen. Vor diesem Hintergrund spricht man von einer Portfoliostrategie – also einem gestreuten Risiko.⁶⁷ Die insgesamt notwendige Investitionsmenge kann dabei allerdings deutlich höher sein. Aber was in der Privatwirtschaft schon lange gängige Praxis ist, sollte auch verstärkt Investitionsentscheidungen der öffentlichen Hand bestimmen. Bei den für die klimaneutrale Umgestaltung notwendigen Investitionen werden sowohl öffentliche als auch private Geldgeber benötigt werden. Um einen ehrlichen und unverzerrten Ideen- und Technologiewettbewerb zu ermöglichen, bedarf es auch einer ehrlichen Technologieoffenheit. Daher ist es ratsam, unvoreingenommen den Wettbewerb die besten technologischen Lösungen für die Zukunft entwickeln zu lassen – insbesondere angesichts der ohnehin kippenden Paradigmen der vergangenen Jahrzehnte. Erst dann können innovative Lösungen ihr volles Klimaschutzpotential ausschöpfen. Nicht zuletzt erlaubt eine solche Technologieoffenheit auch, die besten Lösungsansätze für etwaige Nischen und Sonderfälle zu etablieren.

5.3. Flexible Technologien

Angesichts des russischen Gaslieferungsstopps ist Deutschlands Energieversorgung, wie in Sektion 1.3. beschrieben, aktuell von großen Umstellungen betroffen. Vor diesem Hintergrund werden unterschiedliche alternative Beschaffungsquellen nachverfolgt. Unter anderem der Aufbau von sogenannten LNG-Terminals (*Liquid Natural Gas*) wird nach jahrzehntelanger politischer Ablehnung in vergangenen Legislaturen nun durch die aktuelle Regierung forciert vorangetrieben.⁶⁸ Dadurch werden einige deutsche Häfen mit einer Infrastruktur zum Anlanden von flüssigen Erdgasimporten ertüchtigt. Dadurch kann das Angebot ausgeweitet und vor allem flexibilisiert werden. Denn während konventionelle Pipelines, nach anfänglichen Konstruktionskosten, zwar äußerst günstigen Gastransport versprechen, erlauben sie dennoch keinerlei Flexibilität im Gasbezug und binden Handelspartner zwingend aneinander – wie Deutschland nun schmerzhaft feststellen musste. Hier können LNG-Termi-

nals dringend benötigte Abhilfe schaffen und Deutschland den Zugang zu einem internationalen Netzwerk an Partnern ermöglichen.

Allerdings ist das so bezogene Gas dennoch fossilen Ursprungs und schadet damit dem Klima. Mit steigenden CO₂-Preisen wird die Nachfrage nach fossilen Energieträgern zukünftig wahrscheinlich zurückgehen. Daher sollten schon jetzt bei der Konstruktion der Flüssiggashäfen die voraussichtlich benötigten Anpassungen für eine zukünftige Wasserstoffanlandung berücksichtigt werden. Ansonsten sollte zumindest sichergestellt werden, dass bei Energiepartnern hinreichend Exportkapazitäten an klimaneutralem Biogas oder synthetischem Erdgas zur Verfügung stehen – andernfalls droht der nun errichteten Infrastruktur entweder die Unwirtschaftlichkeit oder aber schlimmer noch unserer Wirtschaft eine technologische Verankerung im fossilen Zeitalter. Beides ist zu verhindern. Daher sollten Infrastrukturinvestitionen eine gewisse technologische Flexibilität erlauben.

5.4. Internationale Kooperation

Der Klimawandel ist ein globales Problem und lässt sich auch nur durch weltweites Zusammenwirken lösen, wie in Sektion 1. erörtert. Vor diesem Hintergrund haben Deutschland und Europa nun nicht nur die Möglichkeit, durch klimaschonende Hochtechnologie eine wichtige Vorreiterfunktion einzunehmen, sondern auch Wohlstand und wirtschaftliche Perspektiven für die Zukunft zu sichern. Die internationale Vernetzung und der Zugang zu den Weltmärkten schafft Anreize, sinnvolle Erfolgsrezepte auch andernorts anzuwenden. Dadurch wachsen wiederum die Absatzmärkte und die Anreize, sinnvolle und innovative Produkte zu entwickeln. Der Technologieaustausch ist aber keine Einbahnstraße: Innovationen und Lösungsansätze, die sich anderswo erfolgreich etablieren konnten, können auch in Europa zur Lösung beitragen. Daher ist ein solcher Austausch nicht nur ökonomisch sinnvoll, sondern bietet sich auch aus einer Klimaschutzperspektive an. Insbesondere die Länder des globalen Südens befinden sich in einem zuvor ungekannten wirtschaftlichen Aufschwung, bei gleichzeitig wachsender Bevölkerung. Diese Völker nun zum Verzicht zu mahnen ist zum Scheitern verurteilt – ganz abgesehen von der offensichtlichen Kurzsichtigkeit und Ungerechtigkeit. Stattdessen können moderne Technologien ein nachhaltiges Wirtschaftswachstum in diesen Regionen garantieren und dabei trotzdem Klima- und Umweltschäden eingrenzen. Letztlich wird sich die Veränderung des globalen Klimas nicht durch die transformativen Kraftakte einzelner Nationen stoppen lassen, sondern nur durch eine konsequente, internationale Zusammenarbeit und das so entstehende geballte, innovative Potential.

⁶⁷ <https://home.kpmg/de/de/home/dienstleistungen/advisory/deal-advisory/strategie/unternehmens-und-portfolio-strategie.html>

⁶⁸ <https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv/2022/kw20-de-ing-beschleunigungsgesetz-894668>

5.5. Finanzierung erleichtern

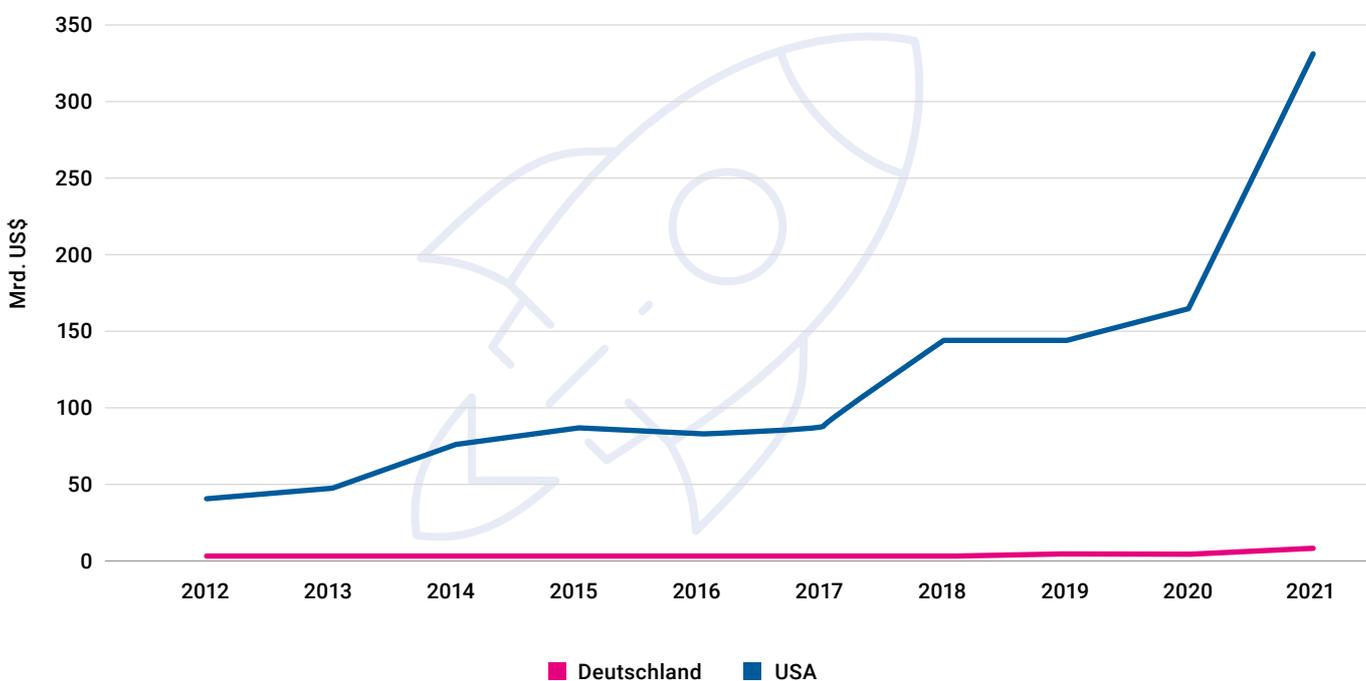
Der oben beschriebene Emissionshandel schafft zweifelsohne Anreize zur Entwicklung und Anwendung von innovativen Technologien. Besonders bahnbrechende Ansätze können allerdings auch in jungen Unternehmen und Start-ups entwickelt werden – sofern die notwendigen finanziellen Mittel zur Verfügung stehen. Aber längst nicht alle Ideen setzen sich durch. Tatsächlich scheitern zwischen 80 und 90 Prozent der jungen Unternehmen innerhalb der ersten drei Jahre.⁶⁹ Daher

⁶⁹ <https://www.gruenderpilot.com/wie-viele-startups-scheitern/>

sind Investitionen in Start-ups mit hohen Risiken verbunden – allerdings können die wirtschaftlichen und technologischen Erfolge diese Risiken durchaus rechtfertigen. In den USA hat sich in den vergangenen vier Jahrzehnten ein blühender und finanzkräftiger Risikokapitalsektor entwickelt – siehe Abbildung 4. Es liegt nicht zuletzt an dessen Aufkommen, dass in dieser Zeit wichtige technologietreibende Unternehmen aus den Vereinigten Staaten stammen.⁷⁰

⁷⁰ <https://www.nzz.ch/meinung/erfolgsgeschichte-risikokapital-von-den-usa-lernen-ld.1614015>

Abb. 4 | Deutschlands Start-ups steht nur ein Bruchteil des US-amerikanischen Risikokapitals zur Verfügung.
Volumen der Venture Capital-Investitionen in Deutschland und den Vereinigten Staaten von 2012 bis 2021 (in Mrd. US\$)



Quellen: Eigene Berechnungen; statista; Grafik: cveiv via Getty Images

Deutschland und die EU haben das Potential, das der Risikokapitalsektor für Jungunternehmen bedeuten könnte, noch lange nicht gehoben. Insbesondere bürokratische Hürden verhindern dessen Wachstum bislang. Besonders stark unterscheiden sich auch die Finanzierungsquellen für die Risikokapitalfonds. In den USA sind große Rentenkassen und Versicherer in diesen stark diversifizierten Fonds investiert und bieten somit enorme Finanzierungspotentiale. Dieses Kapital unterstützt in der Folge junge Unternehmen bei der Umsetzung ihrer Ideen. Diejenigen Unternehmen, die sich durchsetzen, liefern ihren Investoren satte Renditen. Somit profitieren indirekt sowohl die Rentnerinnen und Rentner, deren Rentenkassen durch die Renditen gefüttert werden, als auch die wirtschaftliche Entwicklung insgesamt. Denn diese wird durch innovative Unternehmen und deren Erfolge natürlich auch gestärkt.⁷¹

⁷¹ <https://www.capital.de/wirtschaft-politik/us-investoren-dominieren-deutsche-startup-fonds>

Um auch in Europa stärker von den innovativen Potentialen junger Unternehmen profitieren zu können, muss der Aufbau eines hier ansässigen Risikokapitalmarktes gefördert werden. Maßnahmen wie die aktuell in Arbeit befindliche teilweise Umstellung auf ein kapitalgedecktes Rentensystem gehen in die richtige Richtung.⁷² Ein Abbau bürokratischer Hürden und ein steuer- und arbeitsrechtliches Entgegenkommen könnten das Gründerpotential in Deutschland beflügeln. Für die Entwicklung innovativer Technologien und klimaschützender Maßnahmen könnte dieses Potential eine bedeutende Rolle spielen.

⁷² <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Ministerium/Wissenschaftlicher-Beirat/Gutachten/kapitalgedeckte-rente.html>

