

»» Klimaneutral bis 2050: eine große Transformationsaufgabe für die deutsche Industrie

Nr. 322, 3. März 2021

Autorin: Anke Brüggemann Telefon 069 7431-1736, anke.brueggemann@kfw.de

Das deutsche und europäische Ziel der Klimaneutralität macht einen Strukturwandel hin zu einer klimaneutralen Industrie in Deutschland bis 2050 erforderlich. Vorliegende Klimaschutzszenarien zeigen, dass die Transformation technisch möglich ist. Zentrale Bausteine sind die Verbesserung der Energieeffizienz, der Ausbau der Kreislaufwirtschaft, die Elektrifizierung auf Basis Erneuerbarer Energien, der Einsatz von Biomasse und grünem Wasserstoff sowie die CO₂-Abscheidung und -Speicherung bzw. Nutzung. Die Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität sind allerdings groß: Insbesondere in den Grundstoffindustrien wie Stahl und Chemie sind grundlegende Umstellungen der Produktionsprozesse notwendig und erfordern hohe Investitionen. Viele Schlüsseltechnologien zur Dekarbonisierung müssen noch im industriellen Maßstab skaliert werden. Für den klimagerechten Umbau der Industrie werden zudem große zusätzliche Mengen an Strom aus Erneuerbaren Energien sowie klimaneutraler Wasserstoff benötigt. Der dafür notwendige Infrastrukturaufbau muss frühzeitig vorangetrieben werden.

Bis 2030 besteht ein hoher Reinvestitionsbedarf in der treibhausgasintensiven Grundstoffindustrie. Dieses Gelegenheitsfenster gilt es zu nutzen, um den notwendigen Strukturwandel Richtung Klimaneutralität voranzutreiben. Da viele Schlüsseltechnologien zur Dekarbonisierung der Industrie gegenwärtig deutliche Kostennachteile gegenüber den herkömmlichen fossilen Technologien aufweisen, bedarf es für deren Marktdurchdringung eine politische Rahmensetzung und wirtschaftliche Anreize. Neben einer kontinuierlichen Innovations- und Investitionsförderung ist vor allem ein verlässliches und ansteigendes CO₂-Preissignal notwendig. Ein wirksamer Carbon-Leakage-Schutz insbesondere für energieintensive und im internationalen Wettbewerb stehende Unternehmen ist für die Akzeptanz der Transformation essenziell.

Der klimagerechte Umbau der Wirtschaft bietet zugleich beträchtliche Chancen für zukünftige Wertschöpfung und Beschäftigung. Dies gilt insbesondere für den Export von klimafreundlichen Technologien, denn neben Europa bekennen sich immer mehr Industrieländer zur Klimaneutralität. Als zweitgrößter Exporteur von Klimaschutzgütern nach China hat Deutschland hier eine gute Ausgangsposition.

Industrie zweitgrößter Treibhausgas-Emittent in Deutschland

Der Klimawandel gehört zu den drängendsten Herausforderungen der Gegenwart. Auch Unternehmen spüren zunehmend seine Folgen, sei es durch erhöhten Energiebedarf für die Kühlung von Anlagen und Gebäuden in Hitzeperioden oder Schäden durch extreme Wetterereignisse. Um einen wirksamen Beitrag zur Bekämpfung des globalen Klimawandels zu leisten, hat sich Deutschland wie die Europäische Union dazu bekannt, Klimaneutralität bis 2050 als langfristiges Ziel zu verfolgen, d. h. ab dann sollen „netto“ keine neuen Treibhausgase (THG) mehr ausgestoßen werden. Bis zum Jahr 2030 soll der THG-Ausstoß in Deutschland laut Bundes-Klimaschutzgesetz zunächst um mindestens 55 % gegenüber 1990 gesenkt werden (Stand 2020: -42 %¹). Um das langfristige Ziel der Klimaneutralität erreichen zu können, sind erhebliche Anstrengungen in allen Wirtschaftssektoren erforderlich. Auch die Industrie steht hier in der Verantwortung. Mit einem Anteil von 23 % ist sie der zweitgrößte Emittent von Treibhausgasen in Deutschland – gleich nach dem Energiesektor mit 32 % und noch vor den Sektoren Verkehr und Gebäude mit 20 bzw. 15 % (Stand 2019).² Zu den größten industriellen THG-Emittern gehören die Branchen Stahl, Chemie, Zement, Nichteisenmetalle, Kalk, Glas und Papier sowie die industrielle Eigenstromversorgung.³

Industriesektor soll bis 2050 treibhausgasneutral werden

In den letzten 30 Jahren konnte die Industrie ihren THG-Ausstoß bereits deutlich reduzieren: Zwischen 1990 und 2019 gingen die jährlichen Emissionen um 34 % zurück (Grafik 1). Dies, obwohl im selben Zeitraum die industrielle Bruttowertschöpfung um rund 40 % (preisbereinigt) angestiegen ist.⁴ Die Einsparerfolge konnten insbesondere durch energie- und materialeffizientere Produktionsprozesse und Produkte erreicht werden. Zudem wurde verstärkt auf strombasierte Produktionsprozesse umgestellt.⁵ Ein Großteil der Treibhausgasminderungen erfolgte dabei in den 1990er-Jahren – u. a. verursacht durch den wirtschaftlichen Umbruch in den östlichen Bundesländern und des generellen Strukturwandels hin zu weniger energieintensiven Branchen.⁶ Seit 2010 stagnieren die Emissionen im Industriesektor allerdings weitgehend (Grafik 1). Weitere THG-Minderungen durch Energieeffizienzmaßnahmen und den Einsatz CO₂-ärmerer Brennstoffe wurden durch Energiemehrverbräuche resultierend aus dem Wirtschaftswachstum größtenteils kompensiert. Zwar ist für 2020 im Zuge der Corona-Pandemie mit einem deutlichen Rückgang der industriellen THG-Emissionen zu rechnen. Diese Minderung dürfte jedoch nur temporär sein. Die Erfah-

rungen aus der Weltfinanzkrise 2009 haben gezeigt, dass mit der wirtschaftlichen Erholung auch die Emissionen rasch wieder ansteigen.

2016 hat die Bundesregierung mit dem Klimaschutzplan 2050 erstmals auch sektorbezogene Treibhausgasminde- rungsziele für das Jahr 2030 festgelegt, die mit dem Bundes- Klimaschutzgesetz aus dem Jahr 2019 zudem gesetzlich ver- ankert wurden. Der Industriesektor soll demnach seinen THG-Ausstoß bis 2030 gegenüber 1990 halbieren (49 bis 51 %). Um dieses Ziel zu erreichen, muss der jährliche THG- Ausstoß verglichen mit 2019 noch einmal um rund ein Viertel gesenkt werden (Grafik 1) – gemessen an den stagnierenden Emissionen der letzten zehn Jahre ist also eine deutliche Steigerung des Reduktionstempos im verbleibenden Jahr- zehnt erforderlich. Zudem ist eine weitere Anhebung des Am- bitionsniveaus der nationalen Sektorziele 2030 nicht ausge- schlossen, nachdem sich die Europäische Union im Dezem- ber 2020 auf eine Aufstockung ihres Klimaschutzziels 2030 von -40 % auf mindestens -55 % gegenüber 1990 verständigt hat. Langfristig bis 2050 müssen die Emissionen im In- dustriesektor um 95 % oder mehr reduziert werden. Dies zeigt eine Meta-Analyse einschlägiger Studien und Klima- schutzszenarien, die bis 2050 ein nahezu treibhausgasneu- trales Deutschland modellieren.⁷

Die Industrie steht auf dem Weg zur Klimaneutralität vor einer gewaltigen Transformationsaufgabe. Energiebedingte THG-Emissionen, die derzeit rund zwei Drittel der Industrie- emissionen ausmachen (Grafik 2), müssen bis 2050 fast voll- ständig vermieden werden.⁸ Darunter fallen Emissionen, die z. B. bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern zur Er- zeugung von Prozesswärme und Strom in Industriekraftwer- ken entstehen. Darüber hinaus fallen in der Industrie pro- zessbedingte THG-Emissionen an, die bei chemischen Re- aktionen bestimmter Produktionsprozesse direkt freigesetzt oder bei der nicht-energetischen Nutzung von fossilen Ener- gierohstoffen emittiert werden. Sie machen aktuell ein Drittel

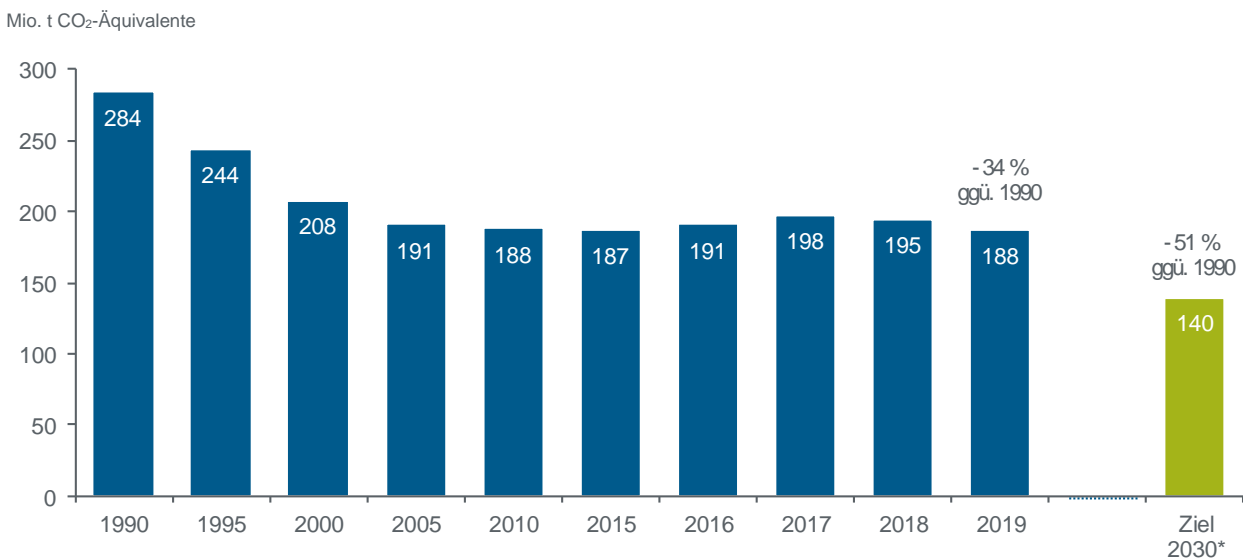
der industriellen THG-Emissionen aus und müssen bis 2050 zumindest umfassend reduziert werden.⁹ Beispiele für pro- zessbedingte Emissionsquellen sind die Zementherstellung, bei der im Rahmen des Produktionsprozesses in Kalkstein gebundenes Kohlendioxid freigesetzt wird, oder die Stahlpro- duktion, sofern Kokscoke als Reduktionsmittel (zum Heraus- lösen des Sauerstoffanteils aus dem Eisenerz) im Hochofen zum Einsatz kommt. Die größten Emittenten prozessbeding- ter THG-Emissionen sind in der Metall-, Chemie- und Bau- stoffindustrie zu finden. Die Reduktion von prozessbedingten Emissionen erfordert oftmals neue Produktionsverfahren, zum Teil lassen sich die Emissionen auch nicht komplett ver- meiden. Nicht vermeidbare THG-Emissionen in der Industrie sind mit Blick auf das Ziel der Treibhausgasneutralität ab 2050 durch natürliche oder künstliche Senken (z. B. Auffor- stung oder CO₂-Abscheidung und -Speicherung) zu kompen- sieren.

Handlungsfelder zur Treibhausgasminde- rung im Wesentlichen bekannt

Wie kann der Umstieg auf eine klimaneutrale Produktion bis 2050 gelingen? Abgeleitet aus den bereits veröffentlichten Studien, die Technologiepfade für ein treibhausgasneutrales Deutschland aufzeigen, sind die technischen Lösungsstrate- gien zur Dekarbonisierung des Industriesektors im Wesentli- chen bekannt:¹⁰

- **Verbesserung der Energieeffizienz:** Gegenwärtig wird knapp 90 % des industriellen Endenergieverbrauchs mit fossilen Energieträgern gedeckt.¹¹ Durch weitere Maßnah- men zur Steigerung der Energieeffizienz könnten treib- hausgasintensive fossile Energieträger direkt eingespart und damit langfristig der Ausbaubedarf klimaneutraler Energieträger reduziert werden. In der Industrie bietet vor allem die effizientere Nutzung der in der Produktion einge- setzten Prozesswärme noch großes Energieeinsparpoten- zial. Mit einem Anteil von rund zwei Drittel am industriellen Endenergieverbrauch ist Prozesswärme das mit Abstand

Grafik 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Industrie



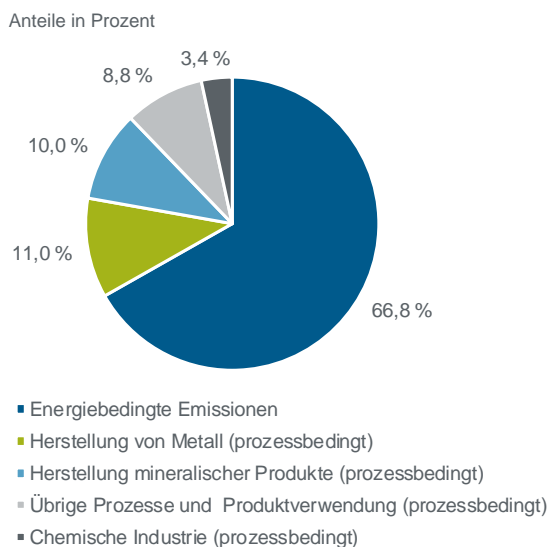
*Sektorziel gem. Klimaschutzplan 2050

Quelle: Umweltbundesamt (2020), KfW Research.

energieintensivste Anwendungsfeld in der Industrie.¹² Prozesswärme wird in sehr verschiedenen industriellen Produktionsprozessen benötigt, sei es zur Dampf- und Heißwassererzeugung oder für den Betrieb von Schmelzöfen und Trocknungsanlagen. Unnötiger Energieverbrauch kann hier u. a. durch eine verbesserte Dämmung bzw. Isolierung von Anlagekomponenten, eine bedarfsgerechte Anlagenauslegung und -steuerung sowie durch eine konsequente Abwärmenutzung vermieden werden. Branchenübergreifend birgt zudem die systematische Optimierung stromverbrauchender Querschnittstechnologien wie Elektromotoren, Druckluft, Pumpen und Beleuchtung weitere Einsparmöglichkeiten.¹³

- **Ausbau der Kreislaufwirtschaft/Steigerung der Materialeffizienz:** Große Energieeinspar- und damit THG-Minderungspotenziale bietet auch die Verbesserung der Ressourceneffizienz. Durch einen sparsamen und effizienten Materialeinsatz sowie mehr Recycling kann der Verbrauch von Primärrohstoffen reduziert werden, deren Gewinnung und Verarbeitung oftmals sehr energieintensiv ist. So benötigt der Einsatz von Sekundär-Aluminium beispielsweise nur 5 % des Energieaufwands, der für die Herstellung von Aluminium aus dem Primärrohstoff Bauxit erforderlich wäre. Im Vergleich zur Erzeugung von Rohstahl aus Eisenerz kann durch die Verwendung von Stahlschrott der Energieverbrauch um 73 % gesenkt werden.¹⁴ Diverse vorliegende Klimaschutzszenarien für Deutschland sehen daher bis 2050 eine deutliche Steigerung der Sekundärrohstoffanteile in der Produktion vor, insbesondere in der Stahl- und Nichteisenmetallindustrie sowie in der Chemiebranche durch das chemische Recycling von Kunststoffabfällen¹⁵. Um Kreisläufe weit gehend schließen zu können und die Akzeptanz für den Einsatz von Sekundärrohstoffen auf der Abnehmerseite zu erhöhen, muss allerdings die Verbesserung der Qualität der Rezyklate zukünftig noch stärker im Fokus stehen. Ansatzpunkte hierfür sind ein materialsparendes und recyclingfreundlicheres Produktdesign sowie eine verbesserte Recyclinglogistik¹⁶.

Grafik 2: THG-Emissionsquellen in der Industrie



Quelle: BMU (2020).

- **Direkte Elektrifizierung auf Basis Erneuerbarer Energien:** Der in der Industrie verbleibende Energiebedarf muss bis 2050 nahezu vollständig durch klimaneutrale Energieträger gedeckt werden. Bei der Bereitstellung industrieller Prozesswärme, die gegenwärtig fast ausschließlich auf Basis fossiler Brennstoffe erfolgt, ist die Elektrifizierung ein möglicher Ansatz zur emissionsfreien Erzeugung von Nieder- bis Hochtemperaturwärme. Voraussetzung hierfür ist, dass der dabei eingesetzte Strom mittels Erneuerbarer Energien (EE) erzeugt wird. Bei den so genannten Power-to-Heat Anwendungen wird elektrische Energie in Wärme umgewandelt. Dies kann z. B. über Elektrodenkessel, Induktionsöfen oder auch Hochtemperaturwärmepumpen erfolgen.¹⁷
- **Einsatz von Biomasse:** Manche Klimaschutzszenarien sehen eine Konzentration der national verfügbaren Biomasse (vor allem Restholz oder schnell wachsende Gehölze aus Kurzumtriebsplantagen) im Industriesektor vor. Hier kann sie zum einen durch Verfeuerung zur klimafreundlichen Erzeugung von Prozesswärme beitragen. Zum anderen kann perspektivisch das bei der Biomasseverbrennung entstehende CO₂ abgeschieden und als erneuerbare Kohlenstoffquelle in der chemischen Industrie eingesetzt werden. Zu beachten ist allerdings, dass das nachhaltige Biomassepotenzial in Deutschland begrenzt ist und auch in anderen Sektoren Biomasse als Mittel zur Erreichung von Klimaneutralität gesehen wird (z. B. im Flugverkehr).
- **Einsatz von grünem Wasserstoff (indirekte Elektrifizierung):** Darüber hinaus ist zu erwarten, dass grüner Wasserstoff eine bedeutende Rolle bei der Dekarbonisierung der Industrie spielen wird.¹⁸ Hergestellt wird grüner Wasserstoff durch die Elektrolyse von Wasser, wobei für die Elektrolyse ausschließlich Strom aus Erneuerbaren Energien verwendet wird. In weiteren Verfahrensschritten kann der erzeugte Wasserstoff (H₂) unter Zuführung einer Kohlenstoffquelle oder Stickstoff zu synthetischen Brennstoffen oder chemischen Grundstoffen weiterverarbeitet werden.¹⁹ Die strombasierten Brenn-, Kraft- und Grundstoffe ermöglichen die Dekarbonisierung solcher industriellen Anwendungsbereiche, die nicht (oder nur schwer) direkt mit Erneuerbaren Energien oder direktelektrisch auf Basis von EE-Strom versorgt werden können. Zu nennen sind hier beispielsweise Teilbereiche der Hochtemperaturerzeugung in energieintensiven Branchen. Auch für eine deutliche Reduzierung von prozessbedingten THG-Emissionen – insbesondere in der Stahl- und chemischen Industrie – dürfte aus heutiger Sicht der Einsatz von grünem Wasserstoff unerlässlich sein. So könnte etwa die Primärstahlerzeugung weit gehend CO₂-frei werden, wenn die derzeit vorherrschende kohlebasierte Hochofenroute durch das Eisen-Direktreduktionsverfahren mit Wasserstoff abgelöst werden würde.²⁰ In der chemischen Industrie werden gegenwärtig große Mengen fossiler Energieträger – vor allem Erdgas und Erdöl – in nicht-energetischer Form als Feedstock verwendet, um daraus wichtige chemische Grundstoffe wie Ammoniak, Methanol oder Ethylen

herzustellen. Die rohstoffliche Nutzung von grünem Wasserstoff in der chemischen Industrie ermöglicht die Substitution dieser fossilen Energieträger und damit eine signifikante THG-Minderung.²¹ Oftmals wird für die wasserstoffbasierte Produktion von chemischen Grundstoffen und Kraftstoffen zusätzlich eine Kohlenstoffquelle benötigt, die mit Blick auf das Ziel der Treibhausgasneutralität langfristig ebenfalls Kriterien der Nachhaltigkeit erfüllen muss. Diskutiert werden in diesem Zusammenhang beispielsweise die Abscheidung von Kohlendioxid aus der Umgebungsluft (Direct Air Capture, DAC) oder die Kohlenstoffgewinnung aus biogenen Quellen und Abfällen (z. B. durch chemisches Recycling von Kunststoffabfällen).

– **CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS):** Bei CCS handelt es sich um eine typische End-of-Pipe-Technologie, bei der CO₂-Emissionen an Kraftwerken oder Industrieanlagen abgeschieden und anschließend dauerhaft in tiefen geologischen Schichten an Land oder im Meeresuntergrund eingelagert werden (z. B. in ausgebeuteten Gasfeldern oder tiefen geologischen Formen unter der Nordsee). Ziel der unterirdischen Speicherung ist der CO₂-Entzug aus der Atmosphäre. Zur möglichen Rolle der CCS-Technologie bei der Dekarbonisierung der Industrie bestehen in den vorliegenden Klimaschutzenszenarien zum Teil stark abweichende Vorstellungen. In manchen Szenarien ist der CCS-Einsatz eine zentrale Klimaschutzstrategie²², um möglichst in großem Umfang an bewährten industriellen Produktionsprozessen festhalten zu können und damit Kosten zu reduzieren. Während andere Studien eher eine Minimierung²³ oder sogar den Verzicht²⁴ der Nutzung dieser Technologie vorsehen. Hintergründe für einen restriktiveren CCS-Ansatz sind nicht ausschließbare Risiken für Umwelt und Gesundheit infolge von CO₂-Freisetzungen durch Unfälle oder Leckagen sowie starke Vorbehalte in der breiten Bevölkerung gegenüber dieser Technologie.²⁵ Gleichwohl gehen die meisten der vorliegenden Szenarien davon aus, dass nach derzeitigem Stand der Technik nicht alle in der Industrie

anfallenden prozessbedingten CO₂-Emissionen langfristig vermieden werden können und ein begrenzter CCS-Einsatz für das Ziel der Treibhausgasneutralität notwendig sein wird. Als prominentes Beispiel wird hier häufig die Zementproduktion genannt. Anzumerken ist jedoch, dass ein Zubau von CO₂-Speichern in Deutschland de facto derzeit nicht möglich ist. In allen Bundesländern, die aus geologischer Sicht als mögliche Standorte in Frage kämen, liegen Beschlüsse vor, die die unterirdische CO₂-Speicherung verbieten oder stark einschränken. Als Alternative wird in einigen Szenarien die etwaige CO₂-Ablagerung in europäischen Lagerstätten genannt. Erwähnt werden in diesem Zusammenhang häufig die Niederlande und Norwegen, die aktuell Projekte zur Erschließung von CO₂-Speichern in entleerten Erdgas- und Erdölfeldern unterhalb der Nordsee bzw. der norwegischen See unterstützen.²⁶

– **CO₂-Abscheidung und -Nutzung (Carbon Capture and Utilization, CCU):** In Abgrenzung zu CCS, bei dem CO₂ in geologischen Formationen dauerhaft gelagert wird, wird bei CCU das abgeschiedene CO₂ als Rohstoff in der Industrie wiederverwertet. So könnte z. B. das abgeschiedene CO₂ in der chemischen Industrie als alternative Kohlenstoffquelle eingesetzt werden (z. B. bei der Kunststoffproduktion). Durch die Eigenschaft von Beton, CO₂ zu absorbieren (CO₂-Mineralisierung), wäre perspektivisch auch die Verwendung in der Baustoffproduktion möglich, mit dem Vorteil, dass dadurch CO₂ in langlebigen Produkten chemisch gebunden werden könnte. Für einen dauerhaften CO₂-Entzug aus der Atmosphäre ist allerdings entscheidend, dass nach der Nutzungsphase der jeweiligen CCU-Produkte eine Kreislaufführung des gebundenen Kohlenstoffs sichergestellt werden kann (z. B. durch chemisches Recycling bei Kunststoffabfällen).²⁷ Da die Endlagerung des abgeschiedenen CO₂ entfällt, hat CCU vermutlich eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz als CCS. Viele CCU-Technologien befinden sich allerdings noch in einem frühen Entwicklungsstadium und sind ihrerseits sehr energieintensiv.

Tabelle 1: Technische Lösungsansätze zur THG-Minderung im Industriesektor für ausgewählte Szenarien

Szenario	Erreichte THG-Minderung in der Industrie bis 2050 ggü. 1990	Energieeffizienz	Kreislaufwirtschaft	direkte Elektrifizierung	Biomasse	Wasserstoff	CO ₂ -Abscheidung
dena 2018 (TM95)	-91%	+++	+	0	0	+++	+
BDI 2018 (95 %-Pfad)	-95 %	+++	+	0	+++	0	+++
Agora 2020 (KN2050)	-111 %	+++	+	+++	+++	+++	++

0 = technischer Lösungsansatz wird nicht oder nur marginal verfolgt
 +/++/+++ = technischer Lösungsansatz wird in mäßigem / starkem / sehr starkem Maß verfolgt

Quelle: KfW Research, in Anlehnung an Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (2020): Vergleich der Strategien für weit gehenden Klimaschutz in der Industrie in deutschen, europäischen und globalen Szenarien, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 10/2020.

Tabelle 1 gibt für drei ausgewählte Klimaschutzszenarien, die bis 2050 eine weit gehende Treibhausgasminde- rung im deut- schen Industriesektor modellieren, einen Überblick über die Relevanz der jeweils beschriebenen technischen Lösungs- strategien in ihren Modellen. Für den Vergleich herangezo- gen wurden die BDI-Studie „Klimapfade für Deutschland“ (95 %-Klimapfad) und die dena-Leitstudie „Integrierte Ener- giewende“ (Technologiemixszenario mit 95 % Klimaziel), die beide 2018 veröffentlicht wurden, sowie die im Jahr 2020 von Agora Energiewende et al. publizierte Studie „Klimaneutrales Deutschland“ (KN 2050). Der Vergleich zeigt, dass die unter- suchten Szenarien für den Industriesektor verschiedene Kombinationen der technischen Lösungsstrategien und auch verschiedene Einsatzintensitäten der einzelnen Technolo- gien vorsehen. Dies lässt den Schluss zu, dass unterschiedli- che Wege zu einer weit gehenden Emissionsminderung im Industriesektor führen können und damit ein gewisser Pla- nungsspielraum besteht. Der Blick auf die Agora-Studie, in der erstmals Technologiepfade für ein klimaneutrales Deutschland und nicht nur für ein 95 %-Treibhausgasminde- rungsziel aufgezeigt wurden²⁸, lässt allerdings vermuten, dass langfristig Beiträge aus allen oben beschriebenen Handlungsfeldern im Industriesektor notwendig sein werden. In welchem Umfang bis 2050 die jeweiligen technologischen Optionen tatsächlich zur Anwendung kommen, dürfte im We- sentlichen von den politischen Rahmensetzungen, der Ko- stenenwicklung der Technologien sowie von der Akzeptanz der Bevölkerung gegenüber den jeweiligen Technologien ab- hängen.

Als Besonderheit bei der Agora-Studie ist darüber hinaus hervorzuheben, dass das Klimaschutzszenario für den Indu- striesektor bis 2050 nicht nur Klimaneutralität vorsieht, son- dern in der Summe sogar Negativemissionen von knapp 30 Mio. t CO₂-Äquivalente. Die industriellen Negativemissio- nen sollen dazu beitragen, unvermeidbare Restemissionen aus der Landwirtschaft zu kompensieren. Ermöglicht werden soll dies durch den Einsatz von Biomasse-CCS in der Indu- strie (Bioenergy with carbon capture and storage, BECCS) – eine Kombination der Bioenergienutzung mit der CO₂-Ab- scheidung und -Speicherung. Während ihrer Wachstums- phase entziehen Pflanzen der Atmosphäre CO₂. Wird dieses CO₂ bei der energetischen Nutzung von Biomasse nicht wie- der freigesetzt, sondern abgeschieden und dauerhaft in tie- fen geologischen Schichten gespeichert, können Negativ- emissionen generiert werden. Aufgrund ihrer räumlich hoch konzentrierten Energiebedarfe für die Erzeugung von Dampf bzw. Hochtemperaturwärme wären gemäß Agora-Studie ins- besondere Standorte der chemischen Industrie und der Stahlindustrie für den Einsatz dieser Technologie geeignet.

Rund 60 % der industriellen Treibhausgasemissionen in Deutschland entfallen auf die Stahl-, Chemie- und Zementin- dustrie.²⁹ Entsprechend müssen diese Branchen die größten THG-Minderungsleistungen bis zum Jahr 2050 erbringen. In Anlehnung an das Agora-Klimaschutzszenario gibt Tabelle 2 einen Überblick, welchen Schlüsseltechnologien zur Minde- rung der THG-Emissionen in den jeweiligen Branchen eine besondere Relevanz zukommt.

Tabelle 2: Überblick wichtiger Schlüsseltechnologien nach Branchen

Branchen	Schlüsseltechnologien
Eisen und Stahl	Erhöhter Anteil Sekundärstahl, Direkt- reduktionsanlagen mit Wasserstoff, Ein- satz von Biomasse, Biomasse-CCS
Chemie	Wasserstoff als Feedstock und Energie- träger, Energieeffizienz, Elektrifizierung, chemisches Recycling von Kunststoffab- fällen, Nutzung von Biomasse, Biomasse- CCS
Zement	Materialeffizienz, neue Zemente, Einsatz von Biomasse, CCS, Biomasse-CCS
Sonstige Industrie	Energieeffizienz, Elektrifizierung, Bio- masse und Wasserstoff als Energieträ- ger, CCS

Quelle: KfW Research, basierend auf Agora Energiewende et al. (2020): Klimaneutrales Deutschland (KN2050).

Transformation der Industrie Richtung Klimaneutralität stellt Deutschland vor große Herausforderungen

Insgesamt zeigen die vorliegenden Klimaschutzszenarien, dass eine klimaneutrale Industrie in Deutschland bis 2050 technisch möglich ist. Auf dem Weg dorthin sind allerdings enorme Herausforderungen zu bewerkstelligen:

Klimaneutralität erfordert umfangreiche Investitionen

Graduelle Treibhausgasminde- rungen durch Energieeffizienz- maßnahmen – wie sie in der jüngeren Vergangenheit in der Industrie zu beobachten waren – werden nicht mehr ausrei- chen, um das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2050 zu erreichen. Vielmehr werden insbesondere in den treibhaus- gasintensiven Branchen grundlegende Umstellungen der Produktionsprozesse erforderlich sein. Viele der dafür benö- tigte Schlüsseltechnologien müssen noch im industriellen Maßstab skaliert werden (z. B. Elektrifizierung von Steam- crackern³⁰ in der chemischen Industrie, wasserstoffbasierte Produktionsverfahren in der Stahlerzeugung, CO₂- Abscheidung in der Zementindustrie). Mögliche finanzielle und technische Risiken bei der großtechnischen Umsetzung neuer Technologien können ein Investitionshindernis darstel- len und sollten daher frühzeitig von der Politik adressiert wer- den.³¹ Der notwendige Strukturwandel Richtung Klimaneutra- lität erfordert umfangreiche Investitionen. Die BDI-Studie „Kli- mapfade für Deutschland“ schätzt in ihrem 95 %-Treibhaus- gasminderungspfad den Mehrinvestitionsbedarf in der Indu- strie (ggü. business as usual) auf insgesamt rund 230 Mrd. EUR bis 2050. Für das anspruchsvollere Ziel der Klimaneu- tralität liegt bislang keine wissenschaftliche Schätzung vor. Der Investitionsmehrbedarf dürfte hier allerdings deutlich hö- her ausfallen, zumal dann aus heutiger Sicht der Einsatz von wasserstoffbasierten Produktionsprozessen und die Nutzung von grünem Wasserstoff als Feedstock in der chemischen In- dustrie notwendig erscheint, die beim BDI-95%- Minderungspfad weit gehend ausgeklammert wurden.

Hohen Reinvestitionsbedarf in der Grundstoffindustrie als Gelegenheitsfenster für die Transformation nutzen

Bei der Transformation ist zu berücksichtigen, dass insbe- sondere in der emissionsintensiven Grundstoffindustrie – wie die Herstellung von Stahl, Zement oder chemischen

Produkten – kapitalintensive Industrieanlagen zum Einsatz kommen, die in der Regel eine technische Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten haben. Gemäß Angaben des Wuppertal Instituts müssen zwischen 2020 und 2030 mehr als die Hälfte der energieintensiven Anlagen in der Stahlherzeugung (Hochöfen) und in der chemischen Industrie (Steamcracker) erneuert werden und nahezu ein Drittel in der Zementindustrie (Zementöfen). Diese große Reinvestitionsphase öffnet ein Gelegenheitsfenster für den notwendigen Strukturwandel hin zur Klimaneutralität. Gleichzeitig besteht aber die Gefahr, dass bei erneuten Investitionen in konventionelle Technologien fossile Strukturen für viele Jahrzehnte zementiert werden (Carbon-Lock-in-Effekt).³² Vor diesem Hintergrund bedarf es bereits jetzt politischer Weichenstellungen, die sicherstellen, dass anstehende Neuinvestitionen mit langer Kapitalbindung kompatibel mit dem Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2050 sind. Dies schafft zugleich Investitionssicherheit und bewahrt Investoren vor „Stranded Investments“.³³

Aufbau der EE-Kapazitäten und Wasserstoffinfrastruktur vorantreiben

Die ausreichende Verfügbarkeit von Strom aus Erneuerbaren Energien und klimaneutralem Wasserstoff ist eine wesentliche Voraussetzung für die Dekarbonisierung der Industrie. Insbesondere getrieben durch die Elektrifizierung der Prozesswärmebereitstellung wird im Agora-Klimaschutzszenario zwischen 2018 und 2050 mit einem Anstieg des jährlichen industriellen Bruttostromverbrauchs von 226 TWh auf 304 TWh gerechnet.³⁴ Hinzu käme noch der Strombedarf für inländisch hergestellten und industriell genutzten grünen Wasserstoff. Um den steigenden Strombedarf aller Sektoren (also einschließlich Verkehr, private Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) im Jahr 2050 vollständig klimaneutral decken zu können, hält das Agora-Szenario bis 2050 eine Steigerung der gegenwärtigen inländischen erneuerbaren Stromerzeugung um den Faktor 3,5 für erforderlich. Diese Zahlen unterstreichen die Notwendigkeit, das Tempo des EE-Ausbaus in Deutschland zu beschleunigen und den dazugehörigen Stromnetzausbau weiter voranzutreiben.

Wasserstoff wird gegenwärtig aus Kostengründen überwiegend auf Basis fossiler Energien hergestellt – zumeist aus Erdgas mittels Dampfreformierung (auch grauer Wasserstoff genannt) – und vornehmlich in der chemischen Industrie rohstofflich genutzt. Der nationale Verbrauch von Wasserstoff liegt derzeit bei rund 55 TWh.³⁵ CO₂-freier-Wasserstoff wird bisher in Deutschland und weltweit nur in sehr geringen Mengen vornehmlich in Pilot- und Demonstrationsanlagen erzeugt. Damit die aktuell noch sehr hohen Herstellungskosten von grünem Wasserstoff und seiner Folgeprodukte sinken und die von der Industrie benötigten Mengen rechtzeitig zur Verfügung stehen, ist eine frühzeitige großvolumige Skalierung der Erzeugungskapazitäten im In- und Ausland notwendig. Neben der Errichtung der Elektrolysekapazitäten gehört dazu auch der Aufbau einer Pipelineinfrastruktur zum Transport und Verteilung des Wasserstoffs an die zukünftigen industriellen Verbrauchsschwerpunkte. Mit der im Juni 2020 verabschiedeten Nationalen Wasserstoffstrategie beabsichtigt die deutsche Bundesregierung den Markthochlauf von

Wasserstofftechnologien im In- und Ausland zu unterstützen. Die Strategie zielt darauf ab, klimaneutralen Wasserstoff an die Wettbewerbsfähigkeit heranzuführen, den Aufbau eines Heimatmarktes zu ermöglichen, Importen den Weg zu ebnen und die notwendigen Investitionen und Innovationen anzustoßen. In diesem Kontext sieht das Konjunkturpaket der Bundesregierung vom Juni 2020 für die Förderung von Erzeugung, Transport, und Nutzung von grünem Wasserstoff und seiner Folgeprodukte zusätzliche Bundesmittel im Umfang von 9 Mrd. EUR vor.

Bis 2030 erwartet die Bundesregierung einen jährlichen nationalen Wasserstoffbedarf – vornehmlich im Industrie- und Verkehrssektor – von insgesamt ca. 90 bis 110 TWh. Hiervon sollen mindestens 13 bis 16 % aus nachhaltigen Quellen durch den Aufbau einer grünen Wasserstoffproduktion in Deutschland mit einer Elektrolysekapazität von bis zu 5 GW stammen. Bis 2035, spätestens 2040 sollen nach Möglichkeit weitere 5 GW installiert werden.³⁶ Für die Herstellung von grünem Wasserstoff werden erhebliche zusätzliche EE-Stromerzeugungskapazitäten benötigt. Mit Blick auf das begrenzte Flächenpotenzial für den EE-Ausbau in Deutschland sowie günstigere Standortbedingungen und damit Kostenvorteile in anderen Ländern gehen die meisten Analysen davon aus, dass Deutschland langfristig in erheblichem Umfang auf Importe von grünem Wasserstoff angewiesen sein wird (z. B. aus Nord- und Südeuropa, Nordafrika).³⁷ In der Agora-Studie „Klimaneutrales Deutschland“ wird für das Jahr 2050 eine Importquote für CO₂-freien Wasserstoff von rund 70 % angenommen. Entsprechende Importstrukturen mit den dazugehörigen Elektrolyse- und EE-Stromerzeugungskapazitäten in den jeweiligen Lieferländern müssen erst noch aufgebaut werden und sind entsprechend zeit- und kapitalintensiv. Die Bundesregierung beabsichtigt daher, die Zusammenarbeit mit anderen EU-Mitgliedstaaten sowie internationalen Partnern zu intensivieren, um den Aufbau globaler Lieferketten für grünen Wasserstoff einschließlich der notwendigen Transportinfrastruktur voranzutreiben. Auf EU-Ebene soll insbesondere die Offshore-Windenergienutzung in Nord- und Ostsee für die Wasserstoffproduktion forciert werden. Zudem sollen im Rahmen der deutschen Entwicklungszusammenarbeit Projekte zur Erprobung von Technologien initiiert werden.

Kontrovers in Politik und Wissenschaft diskutiert wird, ob auch so genannter blauer Wasserstoff für eine Übergangszeit eine gewisse Rolle bei der Dekarbonisierung der Industrie spielen soll. Blauer wird wie grauer Wasserstoff mittels Dampfreformierung aus Erdgas hergestellt. Das CO₂, das dabei entsteht, gelangt allerdings nicht in die Atmosphäre. Es soll abgeschieden und dauerhaft unterirdisch gespeichert werden (CCS=Carbon Capture and Storage). Die Befürworter dieser Technologie argumentieren, solange nicht ausreichend grüner Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen aus Elektrolyseanlagen verfügbar ist, könnte der Einsatz von blauem Wasserstoff eine Option sein, den Markthochlauf von wasserstoffbasierten Produktionsprozessen (z. B. in der Stahlindustrie) frühzeitig voranzutreiben. Unterstellt wird hier

bei, dass die notwendigen Kapazitäten für die Herstellung von blauem Wasserstoff schneller errichtet werden können als beim grünen. Kritiker weisen auf die Gefahr von Carbon-Lock-in-Effekten durch den Aufbau fossiler Infrastrukturen für die Produktion von blauem Wasserstoff hin. Zudem ist blauer Wasserstoff im Vergleich zum grünen nicht vollständig klimaneutral: Zum einen verbleiben bei der CO₂-Abscheidung immer Restemissionen und zum anderen entstehen klimawirksame Vorkettenemissionen bei der Förderung, der Verarbeitung und dem Transport von Erdgas.³⁸

Akzeptanz in der Bevölkerung für den Infrastrukturaufbau schaffen

Die obigen Ausführungen zeigen, dass viele Technologien zur Dekarbonisierung der Industrie umfangreiche Infrastrukturinvestitionen voraussetzen. Zu nennen sind hier z. B. der Ausbau der Kapazitäten von Erneuerbaren Energien, Stromnetze, Wasserstoffpipelines oder unterirdische CO₂-Leitungen und -speicher bei Verwendung der CCS-Technologie. Diese Investitionen werden sichtbare Änderungen des Landschaftsbildes und/oder Eingriffe in die Natur zur Folge haben. Die Sicherung der Akzeptanz in der Bevölkerung wird daher für die Durchführbarkeit dieser Infrastrukturinvestitionen eine wichtige Rolle spielen und eine nicht vernachlässigbare gesellschaftliche Gestaltungsaufgabe auf dem Weg zur Klimaneutralität sein.³⁹

Internationale Wettbewerbsfähigkeit sichern

Während Maßnahmen zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz in der Regel zu Kosteneinsparungen führen, sind die meisten anderen THG-Minderungsoptionen gegenwärtig mit zum Teil beträchtlichen Mehrkosten gegenüber den konventionellen Technologien verbunden.⁴⁰ So zeigen z. B. Schätzungen, dass die Produktionskosten pro Tonne grünem Stahl (hergestellt mittels Direktreduktion mit Wasserstoff) 40 bis 60 % höher liegen werden als beim konventionellen Stahl, der aus der kohlebasierten Hochofenroute stammt.⁴¹ Oder es wird erwartet, dass die spezifischen Kosten bei der Dampfbereitstellung in der chemischen Industrie um 50 bis 80% steigen, wenn die Dampferzeugung mittels fossiler Kraft-Wärme-Kopplung auf einen mit EE-Strom betriebenen Elektrodenkessel umgestellt wird.⁴² Diese Beispiele für Mehrkosten verdeutlichen: Ohne politische Rahmensetzung sowie wirtschaftliche Anreize wird es keine breite Marktdurchdringung der Technologien geben, die für die Erreichung des Ziels der Klimaneutralität im Industriesektor langfristig erforderlich sind. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass Teile der Industrie einem starken internationalen Preiswettbewerb ausgesetzt sind. Dies gilt insbesondere für die Grundstoffindustrie, deren Produkte einen hohen Konformitätsgrad aufweisen (Commodities). Solange es keinen global harmonisierten CO₂-Preis – zumindest auf G20-Ebene – gibt und das Ambitionsniveau beim Klimaschutz außerhalb der EU recht unterschiedlich ist, bedarf es daher für diese Unternehmen weiterer Instrumente, um mögliche Wettbewerbsnachteile durch anspruchsvolleren Klimaschutz auszugleichen. Dies ist für die Akzeptanz der Transformation essenziell. Dem globalen Klimaschutz und dem Industriestandort Deutschland wäre nicht gedient, wenn Produktion und

Emissionen in Länder mit deutlich geringerer Klimaschutzregulierung verlagert würden (Carbon Leakage).

Politik muss Rahmenbedingen schaffen, Anreize setzen, und Anschubfinanzierung leisten

Die weltweit mit dem Pariser Klimaschutzabkommen sowie innerhalb der Europäischen Union eingegangenen Verpflichtungen zur Reduktion der THG-Emissionen machen einen Strukturwandel hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft in Deutschland bis 2050 erforderlich. Angesichts der langen Reinvestitionszyklen in der Industrie muss die Politik bereits frühzeitig die Weichen für die Transformation stellen. Die angespannte Wirtschaftslage infolge der Corona-Krise und gesunkene Preise für fossile Energieträger stellen die Mobilisierung der notwendigen Investitionen aktuell vor neue Hürden. Der Fokus auf die Bewältigung der Corona-Krise darf nicht zu einem Nachlassen bei den Klimaschutzanstrengungen führen, denn der globale Temperaturanstieg schreitet unverändert voran. Der Wiederaufbau der Wirtschaft und die Bekämpfung der Klimakrise sollten daher Hand in Hand gehen, denn eine ambitionierte Klimaschutzpolitik trägt zur Modernisierung der Volkswirtschaft bei und macht sie zukunftsfest.

Damit der klimagerechte Umbau der Wirtschaft gelingt, bedarf es Planungssicherheit für die Investoren. Ein verlässliches und ansteigendes CO₂-Preissignal ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor, damit sich klimafreundliche Technologien langfristig wirtschaftlich gegenüber ihren fossilen und damit klimaschädlichen Alternativen durchsetzen können. Deshalb kommt der Anpassung des nationalen Brennstoffemissionshandels und des EU-Emissionshandelssystems an das jüngst angehobene EU-Treibhausgasemissionsminderungsziel für 2030 große Bedeutung zu. Zur Vermeidung von Carbon Leakage müssen bestehende Ausgleichsmechanismen für energieintensive und im internationalen Wettbewerb stehende Unternehmen (u. a. kostenlose Zuteilung von Emissionsrechten, Strompreiskompensation) fortgeschrieben werden.

Da der CO₂-Preis absehbar in den nächsten zehn Jahren nicht in einem Tempo ansteigen wird, wie er für den Marktdurchbruch von zentralen Schlüsseltechnologien zur Dekarbonisierung der Industrie erforderlich wäre, sind zusätzliche Instrumente der Innovations- und Investitionsförderung erforderlich.⁴³ Dabei geht es zunächst vorrangig darum, den Markthochlauf von neuen Technologien über die Förderung von Demonstrationsanlagen in industriellem Maßstab voranzutreiben und dadurch Kostensenkungspotenziale zu erschließen. Die Bundesregierung hat hier bereits Programme zur finanziellen Förderung von Investitionen auf den Weg gebracht. Um Investitionshemmnisse abzubauen, plant der Bund darüber hinaus die Erprobung von „Carbon Contracts for Difference“ in ausgewählten Branchen (insbesondere in der Stahl- und Chemieindustrie) mit dem Ziel, höhere Betriebskosten und damit Wettbewerbsnachteile von CO₂-armen Schlüsseltechnologien gegenüber herkömmlichen Technologien auszugleichen.⁴⁴ Vorgesehen sind projektbezogene staatliche Betriebskostenzuschüsse für vermiedene

CO₂-Emissionen, wobei sich die Förderhöhe in der Regel aus der Differenz zwischen den tatsächlichen CO₂-Vermeidungskosten und dem aktuellen CO₂-Preis bemisst.

Um verlässliche Absatzmärkte für THG-neutrale Produkte zu schaffen, werden im politischen Raum zudem verpflichtende Einsatzquoten von „grünen“ Grundstoffen in nachfolgenden Wertschöpfungsketten diskutiert (z. B. Einsatz von grünem Stahl in der Autoproduktion, Quote für wasserstoffbasiertes synthetisches Kerosin im Flugverkehr). Auch das öffentliche Beschaffungswesen könnte helfen die Nachfrage nach treibhausgasneutral hergestellten Produkten zu generieren und so die entsprechende Produktion marktwirtschaftlich anzukurbeln. Beispielsweise könnten bei öffentlichen Bauvorhaben Vorgaben für den Einsatz von grünem Stahl oder klimaneutralem Zement gemacht werden.

Perspektivisch müssen die europäischen und internationalen Marktbedingungen so weiterentwickelt werden, dass Investitionen der Industrie in klimaneutrale Schlüsseltechnologien langfristig wettbewerbsfähig und ohne öffentliche Subventionen wirtschaftlich sind. Es liegt auf der Hand, dass die Einführung eines globalen, einheitlichen CO₂-Preises ein effizientes Instrument hierfür wäre.⁴⁵ Die internationale Klimadiplomatie gewinnt vor diesem Hintergrund an Bedeutung. Allerdings dürften sich die internationalen Verhandlungen zur Einführung eines globalen CO₂-Preises sowie dessen Anhebung auf ein hinreichend hohes Niveau schwierig und langwierig gestalten. Im Kontext des jüngst verschärften EU-Klimaziels 2030 besteht daher auf EU-Ebene die Sorge, dass der bestehende Carbon-Leakage-Schutz im EU-Emissionshandel mit zunehmend sinkender Zertifikatsmenge und zu erwartenden steigenden Zertifikatspreisen mittelfristig nicht mehr ausreichen könnte. Die EU-Kommission prüft daher aktuell die Einführung eines CO₂-Grenzausgleichsmechanismus für ausgewählte Sektoren (Carbon Border Adjustment), um das Risiko der Verlagerung von CO₂-Emissionen in Nicht-EU-Länder zu mindern. Im Kern geht es darum, Importwaren, die aus Drittländern ohne vergleichbares Klimaschutzregime stammen, mit einem CO₂-Preis analog dem des europäischen Emissionshandels zu belegen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass ausländische Unternehmen genauso viel für den Klimaschutz bezahlen müssen wie die heimische Konkurrenz. Als größte Herausforderung gilt dabei die WTO-konforme Ausgestaltung des Instruments sowie die korrekte Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks der importierten Güter.

Fazit

Eine klimaneutrale Industrie im Jahr 2050 setzt in treibhausgasintensiven Branchen grundlegende Umstellungen der Produktionsprozesse voraus und erfordert umfangreiche Investitionen. Viele Schlüsseltechnologien müssen noch im industriellen Maßstab skaliert werden. Für den klimagerechten Umbau der Industrie werden zudem große zusätzliche Mengen an Erneuerbare Energien Strom sowie klimaneutraler Wasserstoff benötigt. Der dafür notwendige Infrastrukturaufbau muss frühzeitig vorangetrieben werden.

Bis 2030 besteht ein hoher Reinvestitionsbedarf in der energieintensiven Grundstoffindustrie. Dieses Gelegenheitsfenster gilt es zu nutzen, um den notwendigen Strukturwandel Richtung Klimaneutralität voranzutreiben. Da viele Schlüsseltechnologien zur Dekarbonisierung der Industrie gegenwärtig deutliche Kostennachteile gegenüber den herkömmlichen Technologien aufweisen, bedarf es für deren Marktdurchdringung politischer Rahmensetzung und wirtschaftlicher Anreize. Bei der Gestaltung der Politikinstrumente besteht die Herausforderung, den Rahmen so zu setzen, dass die heimische Industrie bis 2050 Klimaneutralität erreicht und gleichzeitig die internationale Wettbewerbsfähigkeit erhalten bleibt.

Die Transformation hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft ist eine große Herausforderung, bietet aber zugleich beträchtliche Chancen für zukünftige Wertschöpfung und Beschäftigung. Dies gilt insbesondere für den Export von klimafreundlichen Technologien, denn neben Europa bekennen sich immer mehr große Industrienationen zum Ziel der Klimaneutralität mit der Folge, dass der Bedarf an emissionsarmen Technologien weltweit steigen wird. Deutschland hat hier eine gute Ausgangsposition: Bei den Klimaschutzgütern war Deutschland im Jahr 2017 zweitgrößter Exporteur nach China, mit einem Welthandelsanteil von 11 %.⁴⁶

Folgen Sie KfW Research auf
Twitter.

Oder abonnieren Sie unseren kostenlosen E-Mail-Newsletter, und Sie verpassen keine Publikation.

Zur Anmeldung

¹ Vorläufig Schätzung; vgl. Agora Energiewende (2021): Die Energiewende im Corona-Jahr: Stand der Dinge 2020.

² Vgl. Umweltbundesamt (2020): Nationale Trendtabellen für die Treibhausgasemissionen nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes 1990–2018. Gemäß der Sektorenabgrenzung des Klimaschutzplans 2050 umfasst der Sektor Industrie alle Emissionen aus Verbrennungsprozessen und der Eigenstromversorgung des Verarbeitenden Gewerbes sowie Emissionen aus industriellen Prozessen und der Produktverwendung fluoriierter Gase (direkte Emissionen). Die durch Fremdstrom- und Fernwärmebezug verursachten Emissionen sind dem Quellprinzip entsprechend im Sektor Energiewirtschaft erfasst (indirekte Emissionen).

³ Vgl. BMU (2020): Klimaschutz in Zahlen, Ausgabe 2020.

⁴ Vgl. BMWi (2020): Zahlen und Fakten: Energiedaten (Stand: 05.02.2020).

⁵ Vgl. Umweltbundesamt (2020): Indikator: Treibhausgasemissionen der Industrie, <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-treibhausgas-emissionen-der-industrie#die-wichtigsten-fakten> (abgerufen am 21.08.2020).

⁶ Vgl. BMU (2020): a. a. O.

- ⁷ Vgl. Navigant et al. (2019): Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor, Studie im Auftrag des BMWi.
- ⁸ Vgl. ebenda.
- ⁹ Vgl. ebenda.
- ¹⁰ Siehe u. a. dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende; BDI (2018): Klimapfade für Deutschland; Agora Energiewende et al. (2020): Klimaneutrales Deutschland.
- ¹¹ Vgl. dena et al. (2019): Expertise bündeln, Politik gestalten – Energiewende jetzt! Essenz der drei Grundsatzstudien zur Machbarkeit der Energiewende bis 2050.
- ¹² Vgl. BMWi (2020): Zahlen und Fakten: Energiedaten (Stand 09.09.2020).
- ¹³ Vgl. Brüggemann, A. (2015): Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe: Wo liegen die größten Potenziale?, Fokus Volkswirtschaft Nr. 96, KfW Research.
- ¹⁴ Vgl. BDE et al. (2020): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020.
- ¹⁵ Beim chemischen Recycling (oder auch rohstofflichen Recycling) werden Kunststoffabfälle über thermochemische Verfahren bzw. chemische Prozesse in ihre Basischemikalien zerlegt. Die dabei gewonnenen petrochemischen Grundstoffe, wie Öle oder Synthesegase, können in der chemischen Industrie zur Herstellung neuer Kunststoffe oder für andere Zwecke eingesetzt werden und als sekundäre Kohlenstoffquelle fossile Primärrohstoffe ersetzen.
- ¹⁶ Vgl. Brüggemann, A. (2019): Circular Economy als Schlüssel für nachhaltiges Wirtschaften und Ressourcensicherheit, Fokus Volkswirtschaft Nr. 258, KfW Research.
- ¹⁷ Vgl. Agora Energiewende (2019): Klimaneutrale Industrie.
- ¹⁸ Vgl. ebenda.
- ¹⁹ Die Umwandlung von EE-Strom in synthetische Kraft- und Brennstoffe oder Chemikalien ist auch unter dem Begriff Power-to-X (PtX) bekannt.
- ²⁰ Vgl. Lechtenböhrer, S. et al. (2019): Grüner Wasserstoff, das dritte Standbein der Energiewende, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 10/2019. Ergänzende Erläuterung: Bei der Hochofenroute kommt Koks- / Kohle als Reduktionsmittel zum Entzug des Sauerstoffanteils aus dem Eisenerz zum Einsatz. Zugleich wird das Eisenerz mithilfe von Koks- / Kohle in seiner Funktion als Brennstoff zu Roheisen geschmolzen. Anschließend wird das flüssige Roheisen in einem Konverter durch Aufblasen von Sauerstoff zu Stahl weiterverarbeitet. Beim Direktreduktionsverfahren wird Eisenerz mithilfe von Erdgas / Wasserstoff zu festem Eisenschwamm reduziert (DRI, Direct Reduced Iron). Dieser wird anschließend im Elektrolichtbogenofen (EAF, Electric Arc Furnace) geschmolzen und zu Rohstahl verarbeitet. Sofern beim DRI-Prozess grüner Wasserstoff und im Elektrolichtbogenofen Strom aus Erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt, sind gemäß Angabe der Salzgitter AG CO₂-Einsparungen von bis zu 95 % ggü. der Hochofenroute möglich.
- ²¹ Vgl. ebenda.
- ²² Vgl. BDI (2018): Klimapfade für Deutschland.
- ²³ Vgl. dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende.
- ²⁴ Vgl. Umweltbundesamt (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität.
- ²⁵ Vgl. Umweltbundesamt (2018): Carbon Capture and Storage, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#grundlegende-informationen> (abgerufen am 16.12.2020).
- ²⁶ Vgl. Agora Energiewende et al. (2020): Klimaneutrales Deutschland.
- ²⁷ Vgl. Agora Energiewende (2019): Klimaneutrale Industrie.
- ²⁸ Das im Oktober 2019 verabschiedete Bundes-Klimaschutzgesetz enthält erstmals das Bekenntnis der Bundesrepublik Deutschland, Treibhausgasneutralität bis 2050 als langfristiges Ziel zu verfolgen. Zuvor lag das angestrebte 2050-Ziel der Bundesregierung bei 80 bis 95 % THG-Reduktion (ggü. 1990).
- ²⁹ Vgl. Agora Energiewende (2019): Klimaneutrale Industrie.
- ³⁰ Steamcracken bzw. Dampfspaltung ist ein Verfahren der Petrochemie, bei dem durch thermisches Cracken länger-kettige Kohlenwasserstoffe (z. B. Naphtha, auch Rohbenzin genannt) in Gegenwart von Wasserdampf in kurz-kettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden. Es entstehen vor allem Wasserstoff, Methan, Ethen und Propen als Hauptprodukt. Der Steamcracker dient der Herstellung von Chemikalien, die hauptsächlich zu Kunststoffen, Lacken, Lösemitteln oder Pflanzenschutzmitteln weiterverarbeitet werden.
- ³¹ Vgl. Agora Energiewende (2019): Klimaneutrale Industrie.
- ³² Vgl. Agora Energiewende, Wuppertal Institut (2019): Presseinformation "Wie die Politik das Investitionsdilemma der energieintensiven Industrie lösen und industriellen Klimaschutz ermöglichen kann".
- ³³ Unter „stranded investments“ (dt. „gestrandete Investitionen“) versteht man in diesem Kontext Investitionen, deren Ertragskraft oder Marktwert durch die Anforderung einer klimabedingten Transformation drastisch sinkt, bis hin zu ihrer weitgehenden oder vollständigen Wertlosigkeit (z. B. durch neue Gesetze und Regulierungen, verändertes Nachfrageverhalten auf dem Märkten).
- ³⁴ Der im Jahr 2050 prognostizierte Bedarf an EE-Strom und grünem Wasserstoff variiert in den betrachteten Klimaschutzenszenarien zum Teil beträchtlich und ist stark abhängig von den gewählten Technologieoptionen.
- ³⁵ BMWi (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie.
- ³⁶ Vgl. ebenda.
- ³⁷ Vgl. Öko-Institut e. V. (2019): Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland.
- ³⁸ Gemäß Agora-Studie "Klimaneutrales Deutschland" können nur 90 % der CO₂-Emissionen beim Herstellungsprozess des blauen Wasserstoffs abgeschieden werden.
- ³⁹ Vgl. Wuppertal Institut (2020): Integrierte Klima- und Industriepolitik als Kernstück des europäischen Green Deal, in: Wuppertaler Impulse zur Nachhaltigkeit (in brief), Ausgabe 09/2020.
- ⁴⁰ Vgl. BMWi (2020): Wie wird die Produktion klimaneutral? in: Schlaglichter der Wirtschaftspolitik, Monatsbericht März 2020.
- ⁴¹ Vgl. Lösch et al. (2020): Bewertung der Direktreduktionsroute zur Herstellung von Primärstahl mit grünem Wasserstoff, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 5/2020.
- ⁴² Vgl. Agora Energiewende (2019): Klimaneutrale Industrie.
- ⁴³ Vgl. Agora Energiewende (2020): A clean Industry Package for the EU.
- ⁴⁴ BMU (2021): Ausgewählte BMU-Vorhaben bis zum Ende der 19. Legislaturperiode.
- ⁴⁵ Vgl. Edenhofer, O. et al (2020): Das Klimaschutzprogramm der Bundesregierung: Ein Wendepunkt der deutschen Klimapolitik? in: De Gruyter Perspektiven der Wirtschaftspolitik 2020 21(1).
- ⁴⁶ Vgl. Umweltbundesamt (2020): Die Umweltwirtschaft in Deutschland. Entwicklung, Struktur und internationale Wettbewerbsfähigkeit.