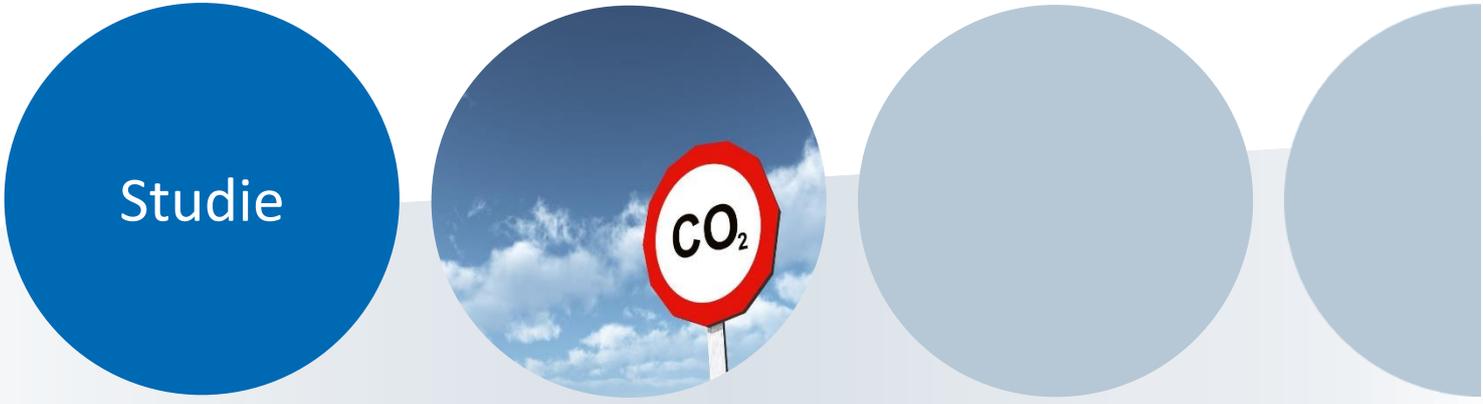


# CO<sub>2</sub>-Kompass Metropole Ruhr

Wasserstoff als Lösung auf dem Weg  
zur Klimaneutralität

Studie für den Regionalverband Ruhr

24.03.2021



Studie

## Impressum

© 2021

IW Consult GmbH  
Konrad-Adenauer-Ufer 21  
50668 Köln  
Tel.: +49 221 49 81-758  
[www.iwconsult.de](http://www.iwconsult.de)

Autoren:

Thorsten Lang  
Hanno Kempermann

Bildnachweise

Titelseite: shutterstock, Michael Rosskothén

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Executive Summary</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Hintergrund und Fragestellung</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß</b> .....	<b>13</b>
3.1	CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland.....	13
3.2	CO <sub>2</sub> -Emissionen in Nordrhein-Westfalen .....	15
3.3	CO <sub>2</sub> -Emissionen im Ruhrgebiet.....	19
<b>4</b>	<b>Dekarbonisierung: Wasserstofftechnologie als wichtiger Lösungsansatz</b> .....	<b>28</b>
4.1	Wasserstofftechnologie und ihre Anwendungsmöglichkeiten.....	28
4.2	Wasserstoffbedarfe der Zukunft .....	30
4.3	Wertschöpfungspotenziale der Wasserstofftechnologie .....	33
<b>5</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale im Ruhrgebiet</b> .....	<b>35</b>
5.1	Energieerzeugung und Industrie.....	36
5.2	Verkehr .....	42
5.3	Wärme .....	43
<b>6</b>	<b>Einsparpotenziale im Ruhrgebiet heben</b> .....	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>48</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Sektorziele und Jahresemissionsmengen des deutschen Klimaschutzplans.....	8
Abbildung 3-1: Anteile der Länder am CO <sub>2</sub> -Ausstoß im Jahr 2017.....	15
Abbildung 3-2: Entwicklung der CO <sub>2</sub> -Emissionen in NRW im Zeitraum 1990 bis 2018.....	18
Abbildung 3-3: Anteil des Ruhrgebiets an den CO <sub>2</sub> -Emissionen in NRW .....	21
Abbildung 3-4: CO <sub>2</sub> -Ausstoß im Ruhrgebiet im Jahr 2018.....	22
Abbildung 3-5: Regionale Anteile an den CO <sub>2</sub> -Emissionen des Ruhrgebiets .....	23
Abbildung 5-1: Standorte der Stahlerzeugung.....	39

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: CO <sub>2</sub> -Emissionen in Deutschland im Jahr 2018.....	14
Tabelle 3-2: CO <sub>2</sub> -Ausstoß in NRW nach Sektoren im Jahr 2018.....	16
Tabelle 3-3: CO <sub>2</sub> -Ausstoß in NRW in der Energiewirtschaft 2018.....	16
Tabelle 3-4: CO <sub>2</sub> -Ausstoß in NRW in der Industrie 2018.....	17
Tabelle 3-5: CO <sub>2</sub> -Ausstoß in NRW im Verkehr 2018.....	17
Tabelle 3-6: CO <sub>2</sub> -Emissionen im Ruhrgebiet nach Industriebranchen im Jahr 2018.....	25
Tabelle 3-7: CO <sub>2</sub> -Emissionen im Ruhrgebiet in der Industrie nach Tätigkeit im Jahr 2018.....	26
Tabelle 4-1: Erwartete jährliche Wasserstoffbedarfe aus der Elektrolyse in TWh .....	32
Tabelle 5-1: Szenarien in der Wasserstoffstudie NRW .....	36
Tabelle 5-2: Auswirkungen der Direktreduktion auf den CO <sub>2</sub> -Ausstoß der Stahlindustrie.....	40
Tabelle 5-3: CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenzial in Raffinerien durch Nutzung von grünem Wasserstoff .....	41
Tabelle 5-4: CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenziale bei der Prozesswärme .....	42
Tabelle 5-5: CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenziale im Ruhrgebiet im Straßenverkehr .....	43
Tabelle 5-6: TechnologiemiX zur Wärmeerzeugung.....	44
Tabelle 5-7: CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenziale im Ruhrgebiet im Wärmebereich.....	44
Tabelle 6-1: CO <sub>2</sub> -Reduktionspotenziale im Ruhrgebiet im Überblick .....	46

# 1 Executive Summary

Spätestens mit dem Green Deal wird das Ziel der Klimaneutralität in der EU verfolgt. Zu erreichen ist dieses ambitionierte Ziel nur durch eine erhebliche Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes: 95 Prozent sind bis zum Jahr 2050 gegenüber 1990 einzusparen. Ein wesentliches Element für eine Strategie zur Klimaneutralität ist die Wasserstofftechnologie. Mit dieser Technologie lassen sich große Mengen CO<sub>2</sub> einsparen.

Dies gilt insbesondere für das Ruhrgebiet. Unabhängig davon, ob zukünftig eher auf die Elektrifizierungs- oder auf die Wasserstofftechnologie gesetzt wird, trägt Wasserstoff im Jahr 2050 in einem Szenario einer 95-prozentigen Reduktion der Treibhausgase in hohem Maße zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei: Die CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale in der Industrie, im Verkehr und bei der Wärmeerzeugung liegen im Ruhrgebiet zwischen rund 19.530.000 und 25.500.000 Tonnen pro Jahr. Gegenüber dem heutigen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 35.540.000 Tonnen (ohne Energiewirtschaft) verringert die Wasserstofftechnik den CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Ruhrgebiet um 55 bis 72 Prozent.

Rund 11 Tonnen CO<sub>2</sub> stößt jeder Mensch in Deutschland durch Wohnen, Strom, Mobilität, Ernährung und sonstigen Konsum pro Jahr aus (Umweltbundesamt, 2020d). Die möglichen CO<sub>2</sub>-Reduktionen im Ruhrgebiet durch die Wasserstofftechnologie entsprechen demnach dem CO<sub>2</sub>-Ausstoß von bis zu 2,3 Millionen Menschen und damit fast der Hälfte aller Einwohner des Ruhrgebiets.

Derzeit sind die Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien noch nicht wirtschaftlich. Damit grüner Wasserstoff wirtschaftlich wird, sind weitere Kostendegressionen bei Wasserstofftechnologien erforderlich. Dabei ist aus Sicht der Bundesregierung ein schneller (internationaler) Markthochlauf für die Produktion und Nutzung von Wasserstoff von großer Bedeutung, um den technologischen Fortschritt sowie Skaleneffekte voranzutreiben. Bis zum Jahr 2030 wird der Markthochlauf insbesondere durch den Industriesektor (Chemie, Petrochemie und Stahl) und zunehmend durch den Einsatz von Brennstoffzellen im Schwerlastverkehr getrieben. Hier bietet das Ruhrgebiet aufgrund seiner Wirtschaftsstruktur beste Ansatzpunkte.

Darüber hinaus sprechen mehrere weitere Gründe für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologie im Ruhrgebiet: Es ist eines von drei Wasserstoffclustern in Deutschland mit einer europaweit einzigartigen Dichte an industriellen Wasserstofferzeugungsanlagen, einer hohen Eigenerzeugung von Wasserstoff als Nebenprodukt der chemischen Industrie, einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur und exzellenten Forschungseinrichtungen, die auch international Impulse setzen. Zudem gibt es im Ruhrgebiet bereits heute vielfältige Initiativen, wie Netzwerke und Forschungsansätze, um die Wasserstofftechnologie voranzutreiben. Insofern überrascht es nicht, dass das Ruhrgebiet das

Wasserstoffranking 2020, das die regionale Verortung der Wasserstofftechnologie in Deutschland untersucht, ganz vorne steht (IW Consult, 2020).

In der Industrie führt bei der Stahlerzeugung und den Raffinerien kein Weg am Wasserstoff vorbei, sollen die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele erreicht werden. Die Wasserstofftechnologie ist ein wesentlicher Teil der Lösung, ohne die das Ziel der Klimaneutralität in Europa nicht erreicht werden kann. Keine Lösung ist dagegen die Verdrängung der Industrie ins Ausland. Das globale Klimaproblem wäre damit mitnichten gelöst, sondern im Gegenteil eher noch verschärft, da die Industrieanlagen im Ausland oftmals noch mehr CO<sub>2</sub> ausstoßen. Ein Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion gelingt nur dann, wenn eine andere, weniger CO<sub>2</sub> emittierende Technologie zum Einsatz kommt. Dies gelingt am besten am heimischen Standort. Es gilt daher, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß weiter zu verringern, ohne die Industrie zu verlieren.

Das Ruhrgebiet kann so seine Kernkompetenzen im Zeitalter der ökologischen Transformation weiterentwickeln und zu einer grünen industriellen Vorreiterregion werden, in der mit neuen Technologien Arbeitsplätze am Puls der Zeit geschaffen und bestehende Arbeitsplätze in einer modernen Industrielandschaft gesichert werden.

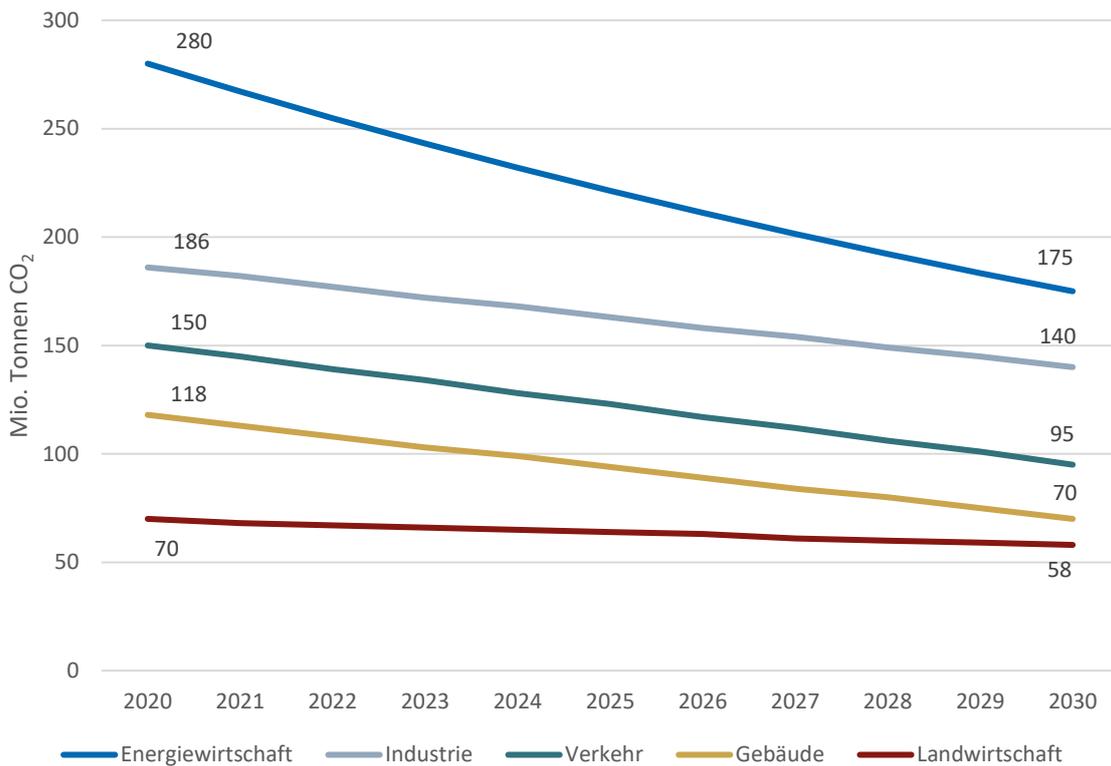
## 2 Hintergrund und Fragestellung

### Klimaneutralität – Wasserstofftechnologie ist Teil der Lösung

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist ein gasförmiger Stoff, der zum Treibhauseffekt beiträgt. Treibhausgase absorbieren einen Teil der Infrarotstrahlung, die sonst von der Erdoberfläche ins Weltall reflektiert wird. Die verbleibende Energie erwärmt die Erdatmosphäre. Treibhausgase können natürlichen Ursprungs sein oder aber sie sind menschengemacht. CO<sub>2</sub> entsteht vor allem bei Verbrennungsprozessen zur Energie- und Wärme Gewinnung und zur Fortbewegung (LANUV, 2020a) und kommt unter allen Treibhausgasen am häufigsten vor. Bestimmte Industrieprozesse wie die Stahlerzeugung, die Herstellung chemischer Produkte oder von Zement setzen ebenfalls CO<sub>2</sub> frei.

Den menschengemachten Klimawandel zu verhindern, ist ein seit Langem verfolgtes Ziel der internationalen Gemeinschaft. Das sogenannte Kyoto-Protokoll zur Ausgestaltung der Klimarahmenkonvention (UNFCCC 1997) der Vereinten Nationen, dessen erste Verpflichtungsperiode von 2008 bis 2012 lief und das bis 2020 verlängert wurde, hat erstmals verbindliche Zielwerte für den Ausstoß von Treibhausgasen festgeschrieben. Das Paris-Abkommen (UNFCCC 2015) hat zum Ziel, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter zwei Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.

Deutschland hatte sich im Rahmen des Kyoto-Protokolls verpflichtet, seine Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2012 gegenüber dem Basisjahr 1990 um 21 Prozent zu senken. Im Durchschnitt der Jahre 2008 bis 2012 gelang es, den Ausstoß von Treibhausgasen um 23,6 Prozent zu senken (Bundesumweltministerium, 2020a). Infolge des Pariser Abkommens hat sich Deutschland im Jahr 2016 mit dem Klimaschutzplan 2050 weitreichende Ziele zur Verringerung der Treibhausgasemissionen gesetzt: Bis zum Jahr 2050 soll Deutschland weitgehend treibhausgasneutral werden; bis 2030 sollten die Treibhausgasemissionen um mindestens 55 Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 gesenkt werden (Bundesumweltministerium, 2020b). Mit dem Klimaschutzplan hat die Bundesregierung im Jahr 2019 konkrete Sektorziele für die Emissionsreduzierung vorgelegt (siehe Abbildung 2-1): Bis zum Jahr 2030 sollen in der Energiewirtschaft 105 Millionen Tonnen, in der Industrie 46 Millionen Tonnen, im Verkehr 55 Millionen Tonnen, bei Gebäuden 48 Millionen Tonnen und in der Landwirtschaft 12 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart werden. Alle Sektoren müssen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion beitragen, um die Klimaziele in Deutschland erreichen zu können. Dies gilt umso mehr, wenn statt nur 55 Prozent 95 Prozent der Treibhausgase eingespart werden sollen.

**Abbildung 2-1: Sektorziele und Jahresemissionsmengen des deutschen Klimaschutzplans**

Quelle: Bundesumweltministerium (2020c)

Nordrhein-Westfalen hat schon im Jahr 2013 sein erstes Klimaschutzgesetz verabschiedet. Darin ist festgelegt, die Gesamtsumme der Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalen bis zum Jahr 2020 um mindestens 25 Prozent und bis zum Jahr 2050 um mindestens 80 Prozent im Vergleich zu den Gesamtemissionen des Jahres 1990 zu verringern. Das erste Ziel dürfte erreicht werden, bis 2050 sind aber noch weitere Anstrengungen möglich, unter anderem die Einführung klimafreundlicher Technologien (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2020a). Dies gilt umso mehr, weil die EU mit dem Green Deal das ambitionierte Ziel ausgegeben hat, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen. Klimaneutralität ist nur durch eine erhebliche Verringerung (95 Prozent gegenüber 1990 bis zum Jahr 2050) des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes möglich.

Um dieses Ziel zu erreichen, sind große Anstrengungen notwendig. Ein wesentliches Element für eine Strategie zur Klimaneutralität ist die Wasserstofftechnologie. Grüner Wasserstoff, der CO<sub>2</sub>-frei hergestellt wird, kann einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Dekarbonisierung der Wirtschaft leisten. In der Stahlindustrie oder Teilen der Chemieindustrie stellt Wasserstoff eine Alternative zur Nutzung fossiler Rohstoffe dar. Auch im Verkehrsbereich kann Wasserstoff zum Einsatz kommen (Bundesumweltministerium, 2020).

### Politik fördert den Ausbau der Wasserstofftechnologie

Mehrere Fraunhofer-Institute haben im Jahr 2019 eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland vorgelegt. Sie zeigen den derzeitigen Stand der Technik auf und benennen Bedarfe in Forschung und Entwicklung. Der Forschungsbedarf wird vor allem in der Weiterentwicklung der Elektrolysetechnologie gesehen, wo die Kosten weiter verringert werden müssen, sowie in der Nutzung von Wasserstoff in

der Industrie. Weiterhin wird ein Ausbau des Wasserstoff-Pipeline-Netzes entlang des Rheins gefordert, da dort große Verbraucher wie Raffinerien sowie die Chemie- und Stahlindustrie angesiedelt sind. Neben weiterem Forschungsbedarf und dem Ausbau des Pipeline-Netzes erfordert der Markthochlauf der Wasserstofftechnologie die Errichtung industrienaher großskaliger Demonstrationsanlagen und deren Integration in die industriellen Prozesse. Zudem muss der regulatorische Rahmen für einen wirtschaftlichen Betrieb mit grünem Wasserstoff angepasst und ein hohes Maß an regulatorischer Planungssicherheit geschaffen werden. Im Verkehrssektor sind nach der Roadmap die Brennstoffzellenantriebe und die Betankungsinfrastruktur weiterzuentwickeln. Dabei sollten Forschung und Entwicklung sowie Systemtests gebündelt werden, um öffentliche Fördermittel konzentriert einzusetzen. Zudem können die Kommunen bei der Beschaffung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen eine Vorreiterrolle einnehmen, was aber eine politische Förderung der Brennstoffzellenmobilität voraussetzt (Fraunhofer, 2019).

Damit Wasserstoff ein zentraler Bestandteil der deutschen Dekarbonisierungsstrategie werden kann, muss die gesamte Wertschöpfungskette (Technologien, Erzeugung, Speicherung, Infrastruktur und Verwendung einschließlich Logistik) in den Blick genommen werden. Die Bundesregierung investiert dazu erheblich in die Wasserstofftechnologien (Deutscher Bundestag, 2020):

- ▶ Im Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) wurden im Zeitraum 2006 bis 2016 rund 700 Millionen Euro an Fördermitteln bewilligt, im Zeitraum 2016 bis 2026 steht ein Fördervolumen von bis zu 1,4 Milliarden Euro bereit.
- ▶ Mit Mitteln des Energieforschungsprogramms wird eine Wasserstoff-Forschungslandschaft aufgebaut.
- ▶ Die anwendungsorientierte Grundlagenforschung zu grünem Wasserstoff wird im Rahmen des Energie- und Klimafonds von 2020 bis 2023 mit 310 Millionen Euro gefördert, zudem soll die anwendungsnahe Energieforschung zu Wasserstofftechnologien von 2020 bis 2023 mit 200 Millionen Euro gestärkt werden.
- ▶ „Reallabore der Energiewende“ sollen den Technologie- und Innovationstransfer von der Forschung in die Anwendung auch bei Wasserstoff beschleunigen. Im Zeitraum 2020 bis 2023 sind für sie Mittel von 600 Millionen Euro vorgesehen.
- ▶ Investitionen in Technologien und großtechnische Anlagen in der Industrie, die Wasserstoff zur Dekarbonisierung von Herstellungsverfahren einsetzen, werden im Rahmen des Nationalen Dekarbonisierungsprogramms im Zeitraum 2020 bis 2023 mit über einer Milliarde Euro gefördert. Weitere Programme sollen den Wasserstoffeinsatz in der Industrieproduktion und zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung und -Nutzung in den Grundstoffindustrien fördern.
- ▶ Das Zukunftspaket des Koalitionsausschusses vom 3. Juni 2020 sieht weitere 7 Milliarden Euro für den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien in Deutschland und weitere 2 Milliarden Euro für internationale Partnerschaften vor.

Um die Potenziale der Wasserstofftechnologien zu heben, sollen nach der Nationalen Wasserstoffstrategie aus Sicht der Bundesregierung jetzt die nächsten Schritte gegangen und gemeinsam mit der Wirtschaft ein echter Markthochlauf realisiert werden (Deutscher Bundestag, 2020). Im Fokus stehen die wirtschaftliche und nachhaltige Erzeugung, der Transport und die Nutzung von Wasserstoff. Beim Markthochlauf des Wasserstoffmarkts erwartet die Bundesregierung in ihrer Nationalen Wasserstoffstrategie folgende Entwicklungen: Bis zum Jahr 2030 wird der Markthochlauf insbesondere durch den Industriesektor (Chemie, Petrochemie und Stahl) getrieben. Der Verkehr, insbesondere durch die brennstoffzellenbetriebene Elektromobilität, trägt nur im geringeren Maße zum steigenden Wasserstoffbedarf bei, weitere Verbraucher wie die Wärmeversorgung werden erst langfristig zusätzlich Bedarfe entwickeln (Deutscher Bundestag, 2020).

Aus Sicht der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung liegt eine Herausforderung beim Markthochlauf der Wasserstofftechnologie in den derzeit noch höheren Kosten, die mit grünem Wasserstoff verbunden sind. Diesen Kostenunterschied zu verringern bzw. aufzulösen, kann nur im Rahmen des Markthochlaufs über Lernkurven und Skaleneffekte erreicht werden. Damit es dazu kommt, ist aus Sicht der Nationalen Wasserstoffstrategie eine staatliche Förderung in der Anfangsphase unvermeidbar. Dem steht allerdings das derzeit gültige Beihilferecht der EU entgegen, das staatliche Unterstützung von größeren Unternehmen untersagt. Wichtige Voraussetzung für den Einsatz von Wasserstoff in der Stahl- und Chemieindustrie ist daher die Anpassung der beihilferechtlichen Rahmenbedingungen in der Europäischen Union (Deutscher Bundestag, 2020). Im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung soll der Markthochlauf aus ökonomischen Gründen gezielt und schrittweise erfolgen. Priorität haben demnach die Nutzung von Wasserstoff als alternativer Kraftstoff in bestimmten Bereichen des Verkehrs sowie als Grundstoff für die stoffliche Verwertung und Einsatz als Reduktionsmittel in der Industrie (Deutscher Bundestag, 2020). Bei der Umstellung auf den Grund- und Brennstoff Wasserstoff spielen die Stahl- und Chemieindustrie eine zentrale Rolle. Als Förderprogramme stehen hier der Fonds zur „Dekarbonisierung in der Industrie“ sowie die Programme zum „Wasserstoffeinsatz in der Industrieproduktion“ (2020 bis 2024) und zur „CO<sub>2</sub>-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien“ bereit. Zudem wird überlegt, in Deutschland oder Europa eine Nachfragequote für klimafreundliche Grundstoffe, wie „grünen Stahl“, einzuführen. Des Weiteren ist geplant, innerhalb branchenspezifischer Dialogformate gemeinsam mit Stakeholdern insbesondere der energieintensiven Industrie langfristige Dekarbonisierungsstrategien auf Basis von Wasserstoff zu entwickeln. Für das Jahr 2020 ist ein Start für die Chemie-, Stahl-, Logistik- und Luftfahrtbranche vorgesehen, weitere Branchen sollen folgen (Deutscher Bundestag, 2020).

Das Land NRW hat am 9. November 2020 seine Wasserstoff-Roadmap vorgestellt. Schon bis zum Jahr 2025 sollen erste Großanlagen zur Wasserstoffproduktion in Betrieb gehen und rund 100 Kilometer Pipeline installiert sein. In Duisburg soll die erste große Anlage zur Stahlerzeugung auf Basis von Wasserstoff entstehen, bis zum Jahr 2030 soll die wasserstoffbasierte Stahlerzeugung weiter ausgebaut werden (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2020c). Damit ist in Nordrhein-Westfalen ein schnelleres Umschwenken auf die wasserstoffbasierte Stahlerzeugung geplant als in den obigen Szenarien angenommen. Zudem sollen bis zum Jahr 2025 im NRW-Verkehrssektor 20 Lkw-Wasserstoff-Tankstellen und 60 Pkw-Wasserstoff-Tankstellen entstehen sowie 400 Brennstoffzellen-Lkw und 500 Wasserstoff-Busse im ÖPNV unterwegs sein. Bis zum Jahr 2030 sollen dann 11.000 Brennstoffzellen-Lkw über 20 Tonnen, 200 Wasserstoff-Tankstellen für Lkw und Pkw, 1.000 Brennstoffzellen-Abfallsammler und 3.800 Brennstoffzellen-Busse für den ÖPNV erreicht werden. Erdgasbasierte Strom- und Wärmeerzeuger sollen in Richtung Wasserstoff weiterentwickelt werden (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2020c). Die Wasserstoff-Roadmap des Landes NRW ist beim Markthochlauf ambitioniert und strebt einen schnellen Markthochlauf an. Insofern ist im Ruhrgebiet bereits in dieser Dekade mit den ersten CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die Wasserstofftechnologie zu rechnen.

Eine Einstiegsstrategie erfordert nach Ansicht der Initiative IN4climate.NRW den schrittweisen Aufbau einer Transport-, Speicher- und Erzeugungsinfrastruktur sowie ein koordiniertes Vorgehen der Akteure und die Zusammenarbeit mit internationalen Partnern. NRW könnte dabei eine Vorreiterrolle einnehmen, da es ein Verbrauchsschwerpunkt von Wasserstoff ist und bereits zahlreiche Projekte mit Schwerpunkt auf Wasserstoffnutzung, -erzeugung und -transport in der Umsetzung oder geplant sind (IN4climate.NRW, 2019). Innerhalb Nordrhein-Westfalens ist es wiederum das Ruhrgebiet, das eine Region par excellence für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologie ist.

## Das Ruhrgebiet – Region par excellence für den Einsatz der Wasserstofftechnologie

Nordrhein-Westfalen ist das bevölkerungsreichste Bundesland und ein wichtiger Industriestandort. In NRW leben 21,6 Prozent der Bevölkerung, im Ruhrgebiet 6,2 Prozent aller in Deutschland lebenden Menschen. Das Ruhrgebiet und Nordrhein-Westfalen haben eine lange Industriegeschichte, geprägt vor allem durch Kohle und Stahl. Noch im Jahr 1992 erwirtschaftete Nordrhein-Westfalen mit 24,5 Prozent und das Ruhrgebiet mit 6,8 Prozent überdurchschnittliche Anteile der Bruttowertschöpfung des Produzierenden Gewerbes. Infolge des strukturellen Wandels sind diese Anteile auf unterdurchschnittliche 18,8 bzw. 4,1 Prozent geschrumpft. Dennoch ist das Ruhrgebiet immer noch ein bedeutender Industriestandort. Das Produzierende Gewerbe ohne Bauwirtschaft erarbeitete im Jahr 2017 im Ruhrgebiet eine Wertschöpfung in Höhe von 31,4 Milliarden Euro. Wäre das Ruhrgebiet ein Bundesland, läge es auf Rang 7 von 17 Ländern. Neben allen ostdeutschen Ländern weisen auch die westdeutschen Stadtstaaten und die Flächenländer Schleswig-Holstein und das industriegeprägte Saarland im Produzierenden Gewerbe eine geringere Wertschöpfung als das Ruhrgebiet auf (VGR der Länder, 2019). Das Ruhrgebiet bietet also auf kompaktem Gebiet mit seiner Chemie- und Stahlindustrie sowie seinem dichten Mobilitätsnetz viele Potenziale, um die neuen Wasserstofftechnologien in die Anwendung zu bringen.

Das Ruhrgebiet bietet auch deshalb gute Ansatzpunkte für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologie, da es eines von drei Wasserstoffclustern in Deutschland ist (FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2019)). Das Cluster umfasst das Ruhrgebiet und zieht sich darüber hinaus entlang des Rheins bis nach Köln, wo die andere Hälfte der nordrhein-westfälischen Raffinerien angesiedelt ist. Nach der FfE-Studie ist das Ruhrgebiet durch eine europaweit einzigartige Dichte an industriellen Wasserstoffherstellungsanlagen, eine hohe Eigenerzeugung von Wasserstoff als Nebenprodukt der chemischen Industrie und eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur gekennzeichnet. Die Wasserstoffinfrastruktur besteht vor allem aus dem 240 Kilometer langen Wasserstoff-Pipeline-Netz des Unternehmens Air Liquide, das eine Transportkapazität von 40.000 Kubikmetern pro Stunde aufweist.

Im Ruhrgebiet gibt es bereits heute vielfältige Initiativen, um die Wasserstofftechnologie voranzutreiben. So setzt sich das Netzwerk „EnergieRegion.NRW“ für den Einsatz von Wasserstoff in der Industrie, im Verkehr und auch im Energiesektor ein. Die Wasserstoffforschung wurde von 2008 bis 2016 im Projekt „Hydrogen-HyWay.NRW“ mit mehr als 30 Millionen Euro gefördert. Auf dem Gebiet der Stahlproduktion existiert das Projekt „Carbon2Chem“, das die Nutzung von Hüttengasen aus der Stahlproduktion als Ausgangsstoff für chemische Produkte untersucht (FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2019).

Gute Ansatzpunkte gibt es auch im Verkehrsbereich: Im Ruhrgebiet stehen bereits heute sechs Wasserstofftankstellen (H2.LIVE, 2020):

- ▶ TOTAL Am Schlütershof 27, Duisburg
- ▶ Star Tankstelle Humboldttring 3, Mülheim an der Ruhr
- ▶ Shell Katernberger Str. 99, Essen
- ▶ H2 Mobility Marie-Curie-Str./Albert-Einstein-Allee, Herten
- ▶ Shell Schützenstr. 2-4, Dortmund
- ▶ H2 Mobility Schattweg 6, Kamen

Aufgrund der Kompaktheit des Ruhrgebiets kann dort ein flächendeckendes Versorgungsnetz für eine hohe Zahl an Fahrzeugen am ehesten erreicht werden. So gibt es zwar auch in der Region Stuttgart bereits heute fünf Wasserstofftankstellen, allerdings gibt es dort weniger Fahrzeuge.

Das Wasserstoffranking 2020 hat untersucht, wo in Deutschland bereits wichtige Grundlagen für die Wasserstofftechnologie liegen. Anhand von elf Indikatoren wurden unter anderem wasserstoffaffine Unternehmen und Gründungen, Hochschulen, Forschungsprojekte und Netzwerke quantitativ und qualitativ erfasst. Dabei zeigt sich, dass die Metropole Ruhr in Deutschland führend ist, noch vor den Metropolregionen Stuttgart, München und Hamburg (IW Consult GmbH, 2020).

### Fragestellung und Vorgehen

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie viel CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Metropole Ruhr gespart werden könnten, wenn konsequent auf den Einsatz von Wasserstoff in der Industrie und der Mobilität gesetzt werden würde. Dieser Frage wird in dieser Studie nachgegangen. Dazu wird in folgenden Schritten vorgegangen:

- ▶ In Kapitel 3 wird die Ausgangslage erfasst. Dazu wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Deutschland, Nordrhein-Westfalen und im Ruhrgebiet ermittelt. Daraus lässt sich abschätzen, welche Potenziale im Ruhrgebiet zur CO<sub>2</sub>-Emissionsreduzierung bestehen.
- ▶ In Kapitel 0 wird die Rolle der Wasserstofftechnologie bei der Dekarbonisierung aufgezeigt. Zunächst werden – basierend auf vorliegenden Studien – die Anwendungsmöglichkeiten der Wasserstofftechnologie vorgestellt. Die prognostizierten Wasserstoffbedarfe zeigen an, welche Rolle die Wasserstofftechnologie in Zukunft spielen könnte. Zudem wird kurz auf die Wertschöpfungspotenziale der Wasserstofftechnologie eingegangen.
- ▶ In Kapitel 0 werden die CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale der Wasserstofftechnologie im Ruhrgebiet ermittelt. Dafür wird an bestehende Szenarien, insbesondere aus der Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen (LBST, 2019) angeknüpft und anhand der spezifischen Strukturen im Ruhrgebiet aufgezeigt, welche Einsparpotenziale im Ruhrgebiet zu erwarten sind.

# 3 Ausgangslage beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß

## 3.1 CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland

Das Umweltbundesamt erstellt nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen an die Europäische Union. Dabei wird zwischen den gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen und den energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen unterschieden. Der Unterschied besteht in den nicht energiebedingten Emissionen der Industrie (Chemie, Eisen und Stahl, Mineralstoffe) und der Landwirtschaft (Tabelle 3-1):

- ▶ In Deutschland gibt es vier große Emittenten von CO<sub>2</sub>, die 99,4 Prozent des CO<sub>2</sub> ausstoßen:
  - ▷ Energiewirtschaft (38,4 Prozent aller CO<sub>2</sub>-Emissionen) mit der Stromerzeugung,
  - ▷ Industrie (23,5 Prozent),
  - ▷ Verkehr (21,4 Prozent) sowie
  - ▷ Haushalte und Kleinverbraucher (16,1 Prozent).
- ▶ 93,2 Prozent aller CO<sub>2</sub>-Emissionen sind energiebedingt, also durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern in Kraftwerken, Motoren oder Heizkesseln.
- ▶ Innerhalb der Industrie sind rund 73 Prozent der CO<sub>2</sub>-Freisetzung energiebedingt, die übrigen 27 Prozent sind prozessbedingt, beispielsweise bei der Herstellung von Eisen und Stahl, Zement oder chemischen Produkten.
- ▶ Mit Ausnahme des Verkehrs haben alle Bereiche gegenüber dem Jahr 1990 erheblich weniger CO<sub>2</sub> ausgestoßen, sodass der gesamte CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Zeitraum 1990 bis 2018 um fast 30 Prozent zurückgegangen ist.

**Tabelle 3-1: CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland im Jahr 2018**

Ausstoß in Millionen Tonnen, Anteil und Veränderung in Prozent

	CO <sub>2</sub> in Mio. Tonnen	Anteil	Veränderung 1990/2018
Energie	290.119	38,4	-31,6
Industrie	177.301	23,5	-27,6
Verkehr	161.664	21,4	-0,1
Haushalte und Kleinverbrauch	121.358	16,1	-43,5
Flüchtige Emissionen aus Brennstoffen	2.007	0,3	-47,7
Landwirtschaft	2.914	0,4	-8,5
Gesamte CO <sub>2</sub> -Emissionen	755.362	100,0	-28,2
davon energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen	704.109	93,2	-28,8

Quelle: Umweltbundesamt (2020a)

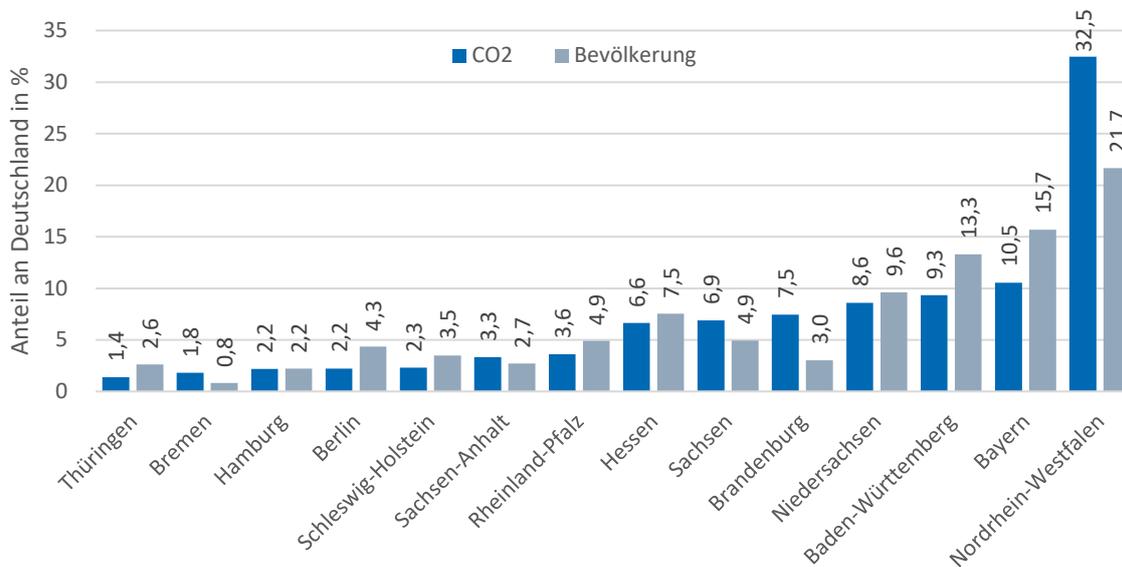
Der Länderarbeitskreis Energiebilanzen bildet energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Bundesländer ab (Länderarbeitskreis Energiebilanzen, 2020). Die Quellenbilanz gibt Auskunft über die Gesamtmenge des im Land emittierten CO<sub>2</sub>, die auf den Verbrauch von Primärenergieträgern in einem Land zurückgeht. In der Verursacherbilanz werden alle Emissionen dargestellt, die auf den Endenergieverbrauch eines Landes bezogen sind. Dabei werden Emissionen für eingeführten Strom berücksichtigt, solche für ausgeführten Strom aber ausgeschlossen. Die Unterscheidung in Quelle und Verursacher ist bei der Bewertung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes relevant. So kann beispielsweise durch eine Fabrikschließung CO<sub>2</sub> an einer bestimmten Quelle verringert werden, gleichzeitig aber der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Verursacher steigen, wenn die Produkte nun aus Fabriken bezogen werden, die auf einem geringeren technologischen Niveau sind und mehr CO<sub>2</sub> freisetzen.

Im Folgenden wird für Deutschland und die Bundesländer die Quellenbilanz betrachtet, da die Quelle Ansatzpunkte für die CO<sub>2</sub>-Reduktion bietet. In der Berichterstattung ist eine zeitliche Verzögerung um drei Jahre üblich (Abbildung 3-1):

- ▶ Nordrhein-Westfalen hat mit 21,7 Prozent den höchsten Bevölkerungsanteil und mit 32,5 Prozent einen noch höheren Anteil am CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Dahinter stehen die Verstromung der Braunkohle (siehe unten) und die energieintensiven Industrien, die überdurchschnittlich in Nordrhein-Westfalen angesiedelt sind.
- ▶ Bayern (10,5 Prozent), Baden-Württemberg (9,3 Prozent) und Niedersachsen (8,6 Prozent) haben ebenfalls signifikante Anteile an den CO<sub>2</sub>-Freisetzungen, allerdings sind diese Anteile geringer als der Bevölkerungsanteil dieser Länder.
- ▶ Neben NRW fällt der CO<sub>2</sub>-Anteil nur in Brandenburg und Sachsen ebenfalls höher aus als der Bevölkerungsanteil. Hintergrund sind die vorhandenen (Braun-)Kohlekraftwerke, die hohe Emissionen in den Ländern verursachen, deren Strom aber auch außerhalb der Länder verbraucht wird. Dies zeigt sich beispielsweise an Baden-Württemberg, wo die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Verursacherbilanz rund ein Viertel höher ausfallen als in der Quellenbilanz. Auch die nordrhein-westfälische Stahlproduktion findet ihre Abnehmer in Ländern wie Bayern und Baden-Württemberg, weshalb die Verursacherbilanz sich auch hier von der Quellenbilanz unterscheiden dürfte.

**Abbildung 3-1: Anteile der Länder am CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Jahr 2017**

Vergleich mit Bevölkerungsanteil; Anteile in Prozent



Übrige Länder mit CO<sub>2</sub>-Anteilen unter 5 Prozent

Quelle: Länderarbeitskreis Energiebilanzen (2020), Umweltbundesamt (2019a); VGR der Länder (2020); eigene Berechnung

## 3.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen in Nordrhein-Westfalen

### NRW unterhält Treibhausgas-Emissionsinventar

Nordrhein-Westfalen geht bei der Erfassung der Treibhausgase über den Verbrauch von Primärenergieträgern hinaus. Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) unterhält dazu ein Treibhausgas-Emissionsinventar, das sich an den Vorgaben des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2006) orientiert. Das Inventar umfasst neben Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) auch die Treibhausgase Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O), halogenierte und perfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFC/PFC), Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) und Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>). Die Emissionen werden für die IPCC-Sektoren Energie, Industrieprozesse, Landwirtschaft, Abfall und Sonstige erfasst (LANUV, 2020a).

### 93,5 Prozent aller Treibhausgase in NRW CO<sub>2</sub>

93,5 Prozent aller Treibhausgase, die in NRW ausgestoßen werden, sind CO<sub>2</sub>. Methan (CH<sub>4</sub>), Lachgas (N<sub>2</sub>O) und die weiteren Treibhausgase HFC/PFC/SF<sub>6</sub>/NF<sub>3</sub> sind dagegen nur für 6,5 Prozent verantwortlich, wobei Methan und Lachgas zusammen 5 Prozent ausmachen (LANUV, 2020a).

Insgesamt wurden in NRW im Jahr 2018 rund 244,2 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> ausgestoßen. Im Jahr 2019 wird nach vorläufigen Daten ein Rückgang um 13 Prozent erwartet, da mit der Stilllegung von Kraftwerksblöcken in Braunkohlekraftwerken bei der Energieerzeugung ein deutlicher Rückgang einherging. Anhand dieser Angaben ist für das Jahr 2019 von rund 212 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> auszugehen.

### Energiewirtschaft, Industrie und Verkehr sind die größten CO<sub>2</sub>-Emittenten

Innerhalb der Sektoren entfällt mehr als die Hälfte der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Energiewirtschaft (52,9 Prozent). Dahinter folgen die Industrie (22,2 Prozent), der Verkehr (13,1 Prozent) sowie Haushalte und Kleinverbrauch (11,4 Prozent). Die übrigen Sektoren spielen beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß keine Rolle. Damit ergeben sich für das Jahr 2018 folgende CO<sub>2</sub>-Mengen (siehe Tabelle 3-2):

- ▶ Energiewirtschaft: 129,1 Millionen Tonnen
- ▶ Industrie: 54,2 Millionen Tonnen
- ▶ Verkehr: 32 Millionen Tonnen
- ▶ Haushalte/Kleinverbrauch: 27,9 Millionen Tonnen

Mit Ausnahme des Verkehrssektors dürfte im Jahr 2019 ein Rückgang stattgefunden haben, vor allem getrieben durch die Energiewirtschaft.

**Tabelle 3-2: CO<sub>2</sub>-Ausstoß in NRW nach Sektoren im Jahr 2018**

Sektor	CO <sub>2</sub> -Ausstoß in Mio. Tonnen	Anteil am Ausstoß in %
Energiewirtschaft	129.144	52,9
Industrie	54.222	22,2
Verkehr	32.034	13,1
Haushalte und Kleinverbrauch	27.912	11,4
Flüchtige Emissionen aus Brennstoffen	146	0,1
CO <sub>2</sub> -Transport und -Speicherung	-	-
Produktanwendung/Sonstige	439	0,2
Landwirtschaft	301	0,1
Abfall	-	-
<b>Zusammen</b>	<b>244.198</b>	<b>100,0</b>

Quelle: LANUV (2020a)

### In der Energiewirtschaft dominiert die öffentliche Strom- und Wärmeversorgung

In der Energiewirtschaft zeigt sich ein eindeutiges Bild. 90,2 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen durch die öffentliche Strom- und Wärmeerzeugung. Raffinerien und Herstellung fester Brennstoffe spielen dagegen eine untergeordnete Rolle (siehe Tabelle 3-3).

**Tabelle 3-3: CO<sub>2</sub>-Ausstoß in NRW in der Energiewirtschaft 2018**

(Teil-)Sektor	CO <sub>2</sub> -Ausstoß in Mio. Tonnen	Anteil am Ausstoß in %
Öffentliche Strom- u. Wärmeversorgung	116.448	90,2
Raffinerien	7.160	5,5
Herstellung fester Brennstoffe/Sonstige		
Energieindustrie	5.536	4,3
<b>Energiewirtschaft</b>	<b>129.144</b>	<b>100,0</b>

Quelle: LANUV (2020a)

### In der Industrie dominieren die Eisen- und Stahlindustrie sowie die chemische Industrie

In der Industrie zeigt sich ein differenzierteres Bild. Die Herstellung von Eisen und Stahl verursacht 40,7 Prozent aller CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Industrie, rund 22 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> werden freigesetzt. Die chemische Industrie, insbesondere die Grundstoffchemie, ist für 28,6 Prozent oder 15,5 Millionen Tonnen der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Dahinter folgen die nicht metallischen Minerale, das heißt die Herstellung von Zement und (Zement-)Steinen. Die Nichteisenmetalle, zu denen die sehr energieintensive Aluminiumproduktion gehört, sind nur für 3,3 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Nordrhein-Westfalen verantwortlich (siehe Tabelle 3-4). Dies dürfte auch daran liegen, dass die Produzenten ihre Energie nicht selbst herstellen, sondern aus der Energiewirtschaft beziehen.

**Tabelle 3-4: CO<sub>2</sub>-Ausstoß in NRW in der Industrie 2018**

(Teil-)Sektor	CO <sub>2</sub> -Ausstoß in Mio. Tonnen	Anteil am Ausstoß in %
Eisen und Stahl	22.042	40,7
Chemische Industrie	15.509	28,6
Nichtmetallische Minerale	10.906	20,1
Nichteisenmetalle	1.775	3,3
Zellstoff, Papier, Druck	1.738	3,2
Nahrungsmittelindustrie	1.259	2,3
Sonstige	994	1,8
<b>Industrie</b>	<b>54.222</b>	<b>100,0</b>

Quelle: LANUV (2020a)

### Im Verkehrssektor dominiert der Straßenverkehr

Im Verkehrssektor zeigt sich ein eindeutiges Bild: 29,1 Millionen Tonnen oder 90,8 Prozent aller CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors stammen aus dem Straßenverkehr. Dahinter folgen der sonstige Verkehr (1,3 Millionen Tonnen oder 4,1 Prozent) und der Schiffsverkehr (1,1 Millionen Tonnen, 3,5 Prozent).

**Tabelle 3-5: CO<sub>2</sub>-Ausstoß in NRW im Verkehr 2018**

(Teil-)Sektor	CO <sub>2</sub> -Ausstoß in Mio. Tonnen	Anteil am Ausstoß in %
Straßenverkehr	29.081	90,8
Sonstiger Verkehr	1.323	4,1
Schiffsverkehr	1.110	3,5
Flugverkehr	407	1,3
Schienenverkehr	114	0,4
<b>Verkehr</b>	<b>32.034</b>	<b>100,0</b>

Quelle: LANUV (2020a)

Innerhalb des Straßenverkehrs entfallen in NRW 64,2 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Personenkraftwagen und 25,6 Prozent auf leichte Nutzfahrzeuge, Lastkraftwagen, Sattelzüge und Busse. Nur 0,7 Prozent werden von Krafträdern ausgestoßen (LANUV, 2020a).

### Rückläufige Entwicklung der Treibhausgasemissionen in NRW

Machten die CO<sub>2</sub>-Emissionen 1990 noch 85,8 Prozent aller Treibhausgasemissionen aus, lag der Anteil 2018 mit 93,5 Prozent höher, da vor allem weniger Methan ausgestoßen wurde (LANUV, 2020a). Gleichwohl sanken auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen der vier Bereiche Energie, Industrie, Haushalte/Kleinverbraucher sowie Verkehr. Betrug der Ausstoß im Jahr 1990 noch 327,2 Millionen Tonnen, sank er bis zum Jahr 2018 auf 245,6 Millionen Tonnen. Dies entspricht einem Rückgang um 24,9 Prozent (Abbildung 3-2).

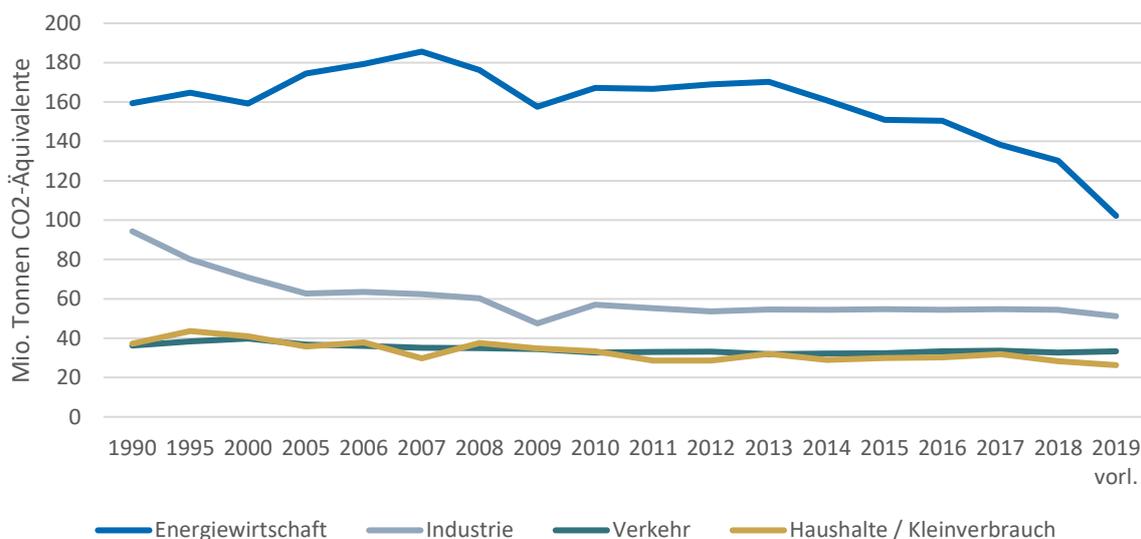
Die Emissionen der Energiewirtschaft bewegten sich zwischen 1990 und 2000 auf etwa gleichbleibendem Niveau und stiegen danach sogar an. Erst ab dem Jahr 2014 zeigte sich eine Abnahme, hervorgerufen durch eine geringere Auslastung der Kraftwerke und die Stilllegung einzelner (Kohle-)Kraftwerksblöcke. Im Zeitraum 1990 bis 2018 sanken die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energiewirtschaft in Nordrhein-Westfalen um 18,4 Prozent. Im Jahr 2019 setzte sich der Rückgang fort, da weitere Braunkohle-Kraftwerksblöcke stillgelegt wurden.

Der Sektor Industrie konnte seit 1990 seine Emissionen deutlich reduzieren. Ursachen sind technische Verbesserungen im Bereich der Energieeffizienz und bei der Emissionsminderung bestimmter Anlagen, der fortgesetzte industrielle Strukturwandel von der Montan- und Stahlindustrie hin zur Dienstleistungswirtschaft sowie die Umstellung der eingesetzten Brennstoffe und zunehmender Einsatz von Ersatzbrennstoffen mit biogenem Anteil (UBA, 2019 nach LANUV, 2020a). Zudem hängen die Emissionen im Sektor Industrie eng mit der realisierten Produktion zusammen. Der Strukturwandel ging einher mit einem Wegfall der Produktion in der Montanindustrie. Im Zeitraum 1990 bis 2018 sanken die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Industrie in Nordrhein-Westfalen um 42,2 Prozent.

Im Sektor Verkehr verringerten sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Nordrhein-Westfalen um 9,7 Prozent von 36,2 auf 32,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Der Sektor Haushalte/Kleinverbrauch konnte seine CO<sub>2</sub>-Emissionen in Nordrhein-Westfalen um 24,1 Prozent von 37,3 auf 28,3 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente senken.

#### Abbildung 3-2: Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in NRW im Zeitraum 1990 bis 2018

Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente



Quelle: LANUV (2020a)

### 3.3 CO<sub>2</sub>-Emissionen im Ruhrgebiet

#### Das Ruhrgebiet – ein starker Teil von NRW

Das Ruhrgebiet ist ein starker Teil Nordrhein-Westfalens. Dies zeigen folgende Zahlen (VGR der Länder, 2019):

- ▶ Im Jahr 2019 lebten gut 5,1 Millionen Menschen in der Region, dies sind 28,5 Prozent aller Einwohnerinnen und Einwohner in Nordrhein-Westfalen. Bei der Fläche hat das Ruhrgebiet nur einen Anteil von 13 Prozent, weshalb hier auf einem Quadratkilometer 1.152 Menschen leben, während in NRW durchschnittlich 526 und in Deutschland 234 Menschen je Quadratkilometer leben.
- ▶ 148 Milliarden Euro Bruttowertschöpfung wurden im Jahr 2017 im Ruhrgebiet erwirtschaftet, rund 23,9 Prozent der gesamten nordrhein-westfälischen Wertschöpfung.
- ▶ Die Wertschöpfung des Produzierenden Gewerbes betrug 2017 rund 38 Milliarden Euro, was 22 Prozent der landesweiten Wertschöpfung im industriellen Sektor entspricht.

#### Strukturwandel hat zur CO<sub>2</sub>-Reduktion beigetragen

Das Ruhrgebiet hat einen erheblichen strukturellen Wandel erlebt, der nicht ohne Auswirkungen auf Nordrhein-Westfalen geblieben ist:

- ▶ Noch im Jahr 1991 wurden in Nordrhein-Westfalen 24 Prozent des deutschen Bruttoinlandsprodukts (BIP) erwirtschaftet, obwohl nur 21,8 Prozent der Bevölkerung dort lebten. Treiber war die Industrie im Ruhrgebiet, der Wertschöpfungsanteil des Produzierenden Gewerbes in NRW an Deutschland betrug 1991 noch 25 Prozent.
- ▶ Im Zeitraum 1991 bis 2019 ist die Wertschöpfung des Produzierenden Gewerbes in NRW um 30,8 Prozent gewachsen, während sie in Deutschland um 73,2 Prozent zulegte. Bremser war auch das Ruhrgebiet: Durch den Strukturwandel stagnierte im Ruhrgebiet die industrielle Wertschöpfung, Wachstumsimpulse blieben aus.
- ▶ Im Jahr 2019 wurden in Nordrhein-Westfalen 20,7 Prozent des deutschen BIPs erwirtschaftet, obwohl dort 21,7 Prozent der Bevölkerung lebten. Der Wertschöpfungsanteil der nordrhein-westfälischen Industrie an Deutschland betrug nur noch 18,8 Prozent.
- ▶ Der in Abbildung 3-2 zu beobachtende Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Industrie geht auch auf den Strukturwandel im Ruhrgebiet zurück.

#### Neue Technologien lösen die Klimawandelproblematik – nicht das Verdrängen von Industrie

Zumindest ein Stück weit sind die oben beschriebenen CO<sub>2</sub>-Reduktionen in der Industrie dem strukturellen Wandel geschuldet. Viele Produktionsstätten der Montanindustrie, die einen hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß hatten, wurden geschlossen. Dies bedeutet aber nicht, dass das globale Klimaproblem damit gelöst ist. Vielmehr hat eine Produktionsverlagerung ins Ausland stattgefunden, einfacher Stahl wird heute in China gekocht. Die dortigen Anlagen dürften für die gleiche Produktionsmenge mehr CO<sub>2</sub> ausstoßen. Daher kann es kein Ziel sein, Industrie am heimischen Standort zu verdrängen, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu mindern. Das globale Klimaproblem wäre damit mitnichten gelöst, sondern im Gegenteil eher noch verschärft. Ein Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion gelingt nur dann, wenn eine andere, weniger CO<sub>2</sub> emittierende Technologie am heimischen Standort zum Einsatz kommt. Es gilt daher, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß weiter zu verringern, ohne die Industrie zu verlieren. Zwar werden einige Technologien in Zukunft nicht mehr zum Einsatz kommen, gleichzeitig wird es aber neue Technologien und damit neue Chancen geben, die den Wohlstand in Zukunft sichern.

## CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Ruhrgebiet

Das LANUV stellt im Online-Emissionskataster Luft NRW regionale Daten zum Ausstoß von Treibhausgasen bereit (LANUV, 2020b). In allen Katasterbereichen verstreicht zwischen dem Ende des Erhebungszeitraums und der Bereitstellung validierter Daten erhebliche Zeit, sodass zwischen dem Erhebungsjahr und der Verfügbarkeit der Daten mehrere Jahre liegen. Im Emissionskataster wird zwischen bedeutsamen Emittentengruppen in NRW unterschieden, die von der in Kapitel 3.1 verwendeten Abgrenzung der Sektoren abweichen:

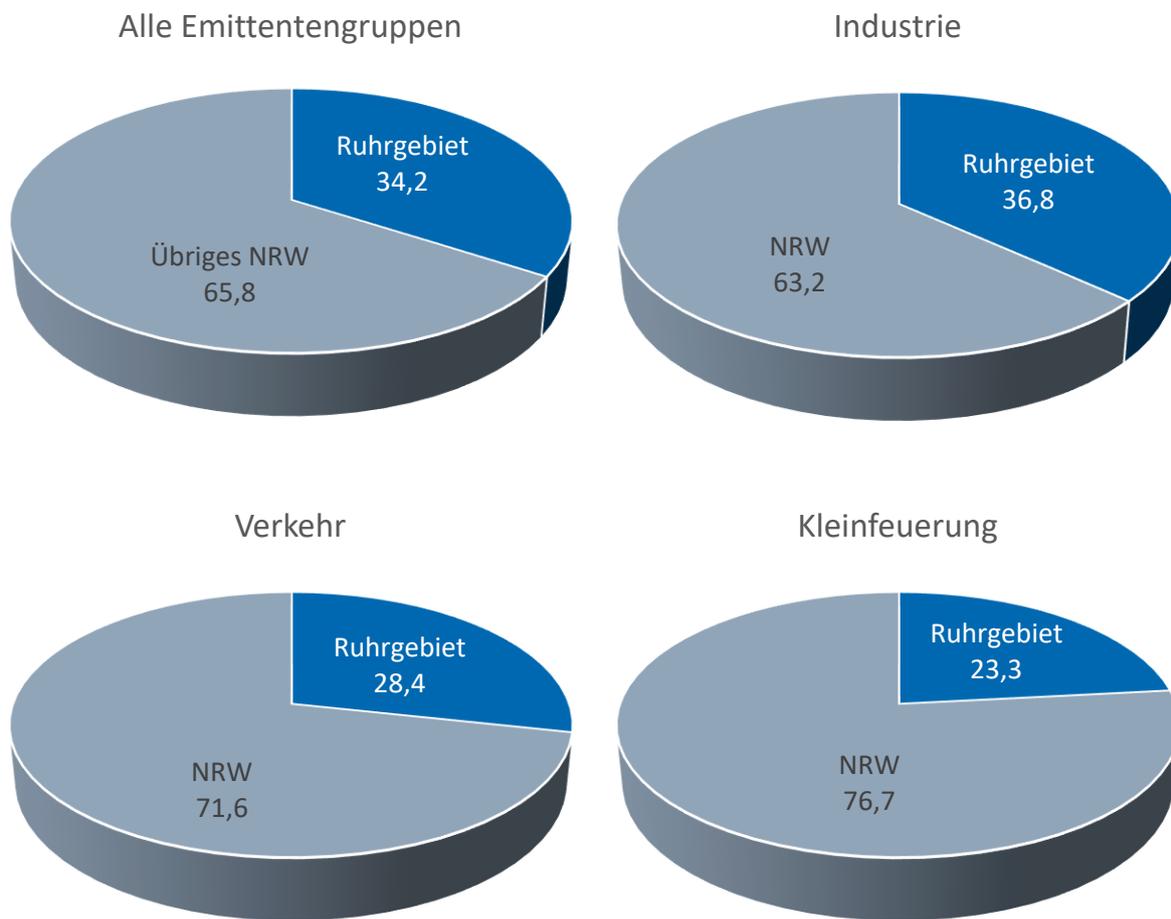
- ▶ **Industrie:** Die Industrie umfasst im Vergleich zu der Abgrenzung in Kapitel 3.1 die Energiewirtschaft und die Industrie. Enthalten sind alle Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen, die Daten der Emissionserklärungen nach der 11. Verordnung über Emissionserklärungen (BlmSchV) nach Anhang der 4. BlmSchV (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) abgeben müssen. Der aktuelle Berichtszeitraum im Online-Emissionskataster Luft NRW ist das Jahr 2016.
- ▶ **Kleinfeuerungsanlagen:** Diese Gruppe berücksichtigt Feuerungsanlagen aus Gewerbe, Haushalten etc., die nicht unter den Geltungsbereich der 4. BlmSchV fallen. Darunter fallen insbesondere Heizkessel und Öfen, die mit Gas, Öl oder Holz befeuert werden. Während Öl und Gas mehr CO<sub>2</sub> ausstoßen als Holzkessel, stoßen Holzkessel deutlich mehr Feinstaub und andere Schadstoffe aus (Umweltbundesamt, 2020b). Der aktuelle Berichtszeitraum im Online-Emissionskataster Luft NRW ist das Jahr 2015.
- ▶ **Verkehr:** Die Gruppe „Verkehr“ umfasst die Teilbereiche Straßen (Kfz)-, Offroad-, Schienen-, Schiffs- und Flugverkehr. Für den Straßenverkehr werden Daten auf Grundlage verkehrsspezifischer Kenngrößen wie Verkehrsstärken und Fahrleistungen mithilfe von Emissionsfaktoren in Abhängigkeit von kraftfahrzeugspezifischen Einflussfaktoren (zum Beispiel der Art des Motors und des Abgasnachbehandlungskonzeptes usw.) modelliert und berechnet. Der aktuelle Berichtszeitraum im Online-Emissionskataster Luft NRW ist das Jahr 2013.

Die Daten des Online-Emissionskatasters Luft NRW werden verwendet, um die Strukturen innerhalb des Regionalverbands Ruhr differenziert zu betrachten. Zunächst werden die Anteile des Ruhrgebiets an den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Landes NRW dargestellt (Abbildung 3-3):

- ▶ Innerhalb Nordrhein-Westfalens stößt das Ruhrgebiet mit 34,2 Prozent überdurchschnittlich viel CO<sub>2</sub> aus. Sein Bevölkerungsanteil an NRW beträgt nur 28,5 Prozent, sein Wertschöpfungsanteil 23,9 Prozent.
- ▶ Treiber im Ruhrgebiet ist die ansässige Industrie, die zu gut 80 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen beiträgt. Diese produziert CO<sub>2</sub>-intensiver, was den im Vergleich zur Wertschöpfung höheren Anteil an den CO<sub>2</sub>-Emissionen erklärt.
- ▶ Die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Sektor Verkehr entsprechen mit 28,4 Prozent fast dem Bevölkerungsanteil, wobei das Ruhrgebiet eine höhere Bevölkerungsdichte aufweist, wodurch eine besondere Eignung für den Durchsatz für neue Technologien besteht.
- ▶ Bei der Kleinfeuerung ist das Ruhrgebiet unterdurchschnittlich an den CO<sub>2</sub>-Emissionen beteiligt.

**Abbildung 3-3: Anteil des Ruhrgebiets an den CO<sub>2</sub>-Emissionen in NRW**

Anteil in Prozent



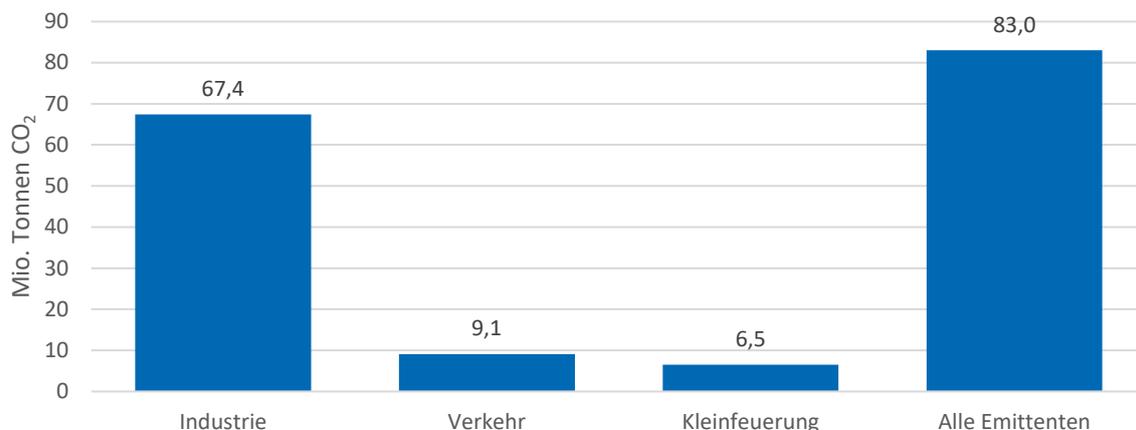
Quelle: LANUV (2020b)

Anhand der Strukturdaten wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Ruhrgebiet für das Jahr 2018 geschätzt. Es zeigt sich folgendes Bild (Abbildung 3-4):

- ▶ Insgesamt wurden im Ruhrgebiet im Jahr 2018 rund 83.022.000 Tonnen CO<sub>2</sub> freigesetzt.
- ▶ Der größte Teil stammt mit 81,2 Prozent bzw. 67.412.000 Tonnen aus der Industrie, wobei hier die Energieerzeugung und die übrige Industrie zusammengefasst sind.
- ▶ 9.103.000 Tonnen CO<sub>2</sub> bzw. 11 Prozent werden im Verkehr ausgestoßen.
- ▶ Die Kleinf Feuerung trägt mit 6.507.000 Tonnen bzw. 7,8 Prozent ebenfalls erheblich zur CO<sub>2</sub>-Freisetzung bei.

**Abbildung 3-4: CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Ruhrgebiet im Jahr 2018**

Millionen Tonnen



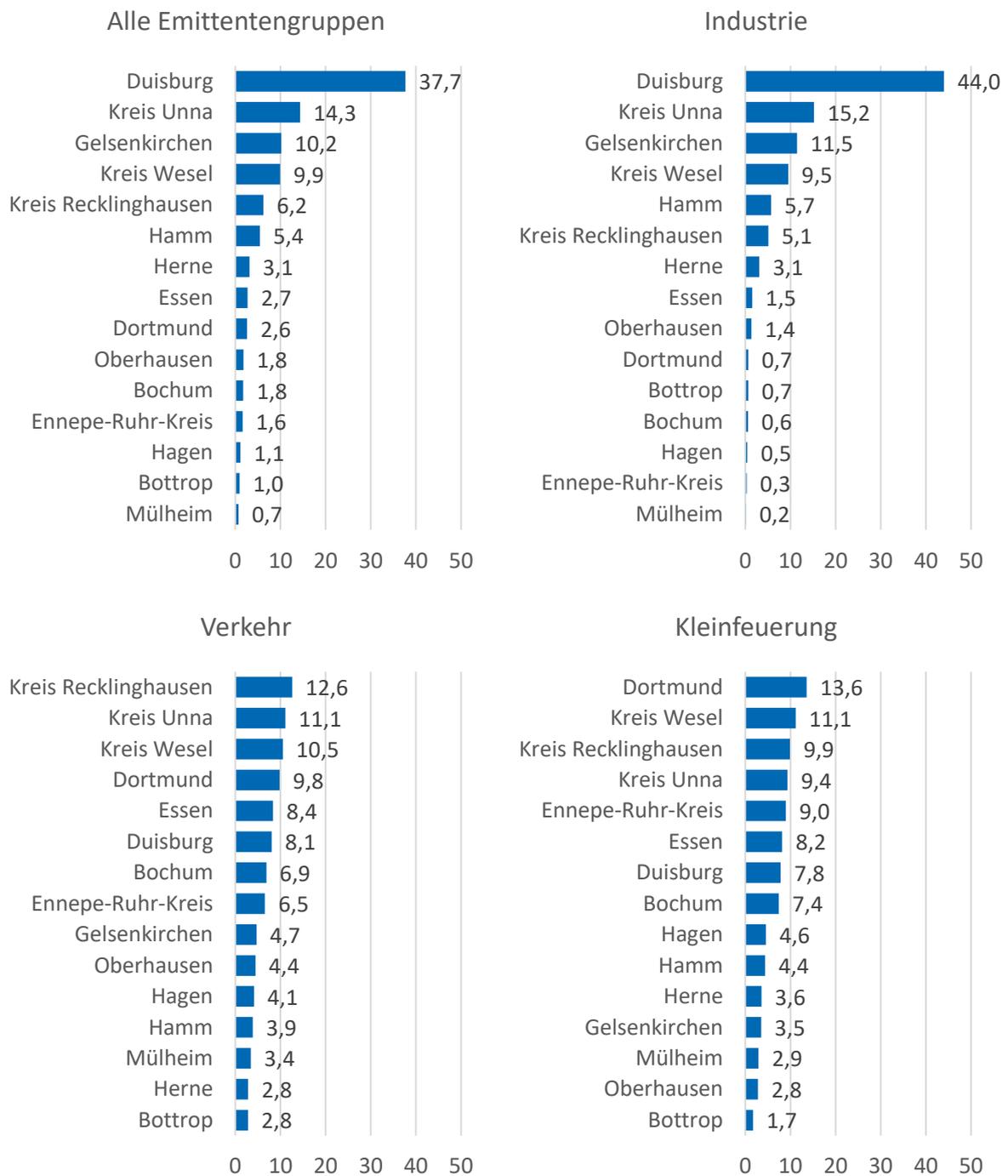
Quelle: LANUV (2020a), LANUV (2020b); eigene Berechnung

Innerhalb der Metropole Ruhr tragen die einzelnen Kreise in unterschiedlichem Maße zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei (Abbildung 3-5):

- ▶ Die Stadt Duisburg hat innerhalb des Ruhrgebiets den höchsten Anteil (37,7 Prozent) am CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Treiberin ist hier die Duisburger Industrie, die 44 Prozent der Industrieemissionen im Ruhrgebiet hervorbringt – vor allem wegen der Duisburger Stahlwerke.
- ▶ Die Kreise Unna und Wesel sowie Gelsenkirchen weisen ebenfalls überdurchschnittliche Anteile am CO<sub>2</sub>-Ausstoß auf. Auch dort ist die Industrie die Treiberin, die Kreise folgen auf Duisburg. Zudem weisen die Kreise Unna und Wesel auch beim Verkehr und der Kleinfuehrung überdurchschnittliche Anteile auf.
- ▶ Die geringsten Anteile an den CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Metropole Ruhr weisen die Städte Mülheim an der Ruhr, Bottrop und Hagen auf, da die Industrieemissionen aber den Gesamtwert dominieren, bleibt die Gesamtrangfolge davon unberührt.
- ▶ Während die Industrie von den Standortentscheidungen der Unternehmen abhängt, spielt beim Verkehr und der Kleinfuehrung die Einwohnerverteilung eine Rolle. Im Kreis Recklinghausen leben rund 12 Prozent der Menschen aus dem Ruhrgebiet, weshalb der CO<sub>2</sub>-Anteil von 12,6 Prozent nur leicht überdurchschnittlich ist. Im Kreise Wesel leben 9 Prozent und im Kreis Unna 7,7 Prozent der Einwohner, weshalb die CO<sub>2</sub>-Anteile beim Verkehr von 10,5 und 11,1 Prozent eher überdurchschnittlich sind. Dortmunds Anteil bei der Kleinfuehrung (13,5 Prozent) liegt ebenfalls deutlich über dem Einwohneranteil (11,5 Prozent) der Stadt.

**Abbildung 3-5: Regionale Anteile an den CO<sub>2</sub>-Emissionen des Ruhrgebiets**

Anteil in Prozent



Quelle: LANUV (2020b)

### Detaillierter Blick auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Industrie im Ruhrgebiet

Industriebetriebe müssen jährlich Informationen über ihre CO<sub>2</sub>-Freisetzungen liefern, wenn der Schwellenwert von 100.000 Tonnen überschritten wird. Diese werden im „Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister“ (Pollutant Release and Transfer Register PRTR), das auf ein internationales Abkommen der UN-Wirtschaftskommission für Europa (UNECE) zurückgeht (Europäische Union, 2006), gesammelt und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Die im PRTR für NRW abgebildeten Industrieunternehmen des Jahres 2018 stehen – trotz des Schwellenwerts – für 94,8 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die das LANUV in den Sektoren Energiewirtschaft und Industrie ausweist (siehe oben). Damit gibt das PRTR einen guten Einblick in die Emissionen der Industrie im Ruhrgebiet.

Im Ruhrgebiet tragen die zehn Branchen mit den höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu 98,5 Prozent der im PRTR abgebildeten CO<sub>2</sub>-Ausstöße bei. Zwei Branchen stechen dabei besonders heraus (siehe Tabelle 3-6):

- ▶ Die Elektrizitätserzeugung trägt zu 37,9 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Ruhrgebiet bei. Das Ruhrgebiet trägt in dieser Branche zu 20,1 Prozent der landesweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei, da die Braunkohlekraftwerke im Rheinischen Revier am meisten zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß beitragen.
- ▶ Die Stahlindustrie des Ruhrgebiets trägt zu 37,4 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Landes bei. Innerhalb des Landes NRW entfallen sämtliche Emissionen der Eisen- und Stahlerzeugung auf das Ruhrgebiet.
- ▶ Die Mineralölverarbeitung (6,3 Prozent der Emissionen im Ruhrgebiet) und die chemische Grundstoffindustrie (5,2 Prozent der Emissionen im Ruhrgebiet) verursachen rund die Hälfte der landesweiten Emissionen der jeweiligen Branche.
- ▶ Die einzigen Kokereien des Landes stehen ebenfalls im Ruhrgebiet. Sie stoßen 3,9 Prozent des CO<sub>2</sub> im Ruhrgebiet aus, sämtliche Emissionen von Kokereien in Nordrhein-Westfalen.

**Tabelle 3-6: CO<sub>2</sub>-Emissionen im Ruhrgebiet nach Industriebranchen im Jahr 2018**

Branchen nach WZ 2008

Rang	Branche	Anzahl Betriebe	CO <sub>2</sub> -Ausstoß in Tonnen	Anteil am Ruhrgebiet in %	Anteil an NRW in %
1	Elektrizitätserzeugung	14	21.969.000	37,9	20,1
2	Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen	10	21.662.000	37,4	100,0
3	Mineralölverarbeitung	2	3.660.000	6,3	51,5
4	Herstellung von sonstigen organischen Grundstoffen und Chemikalien	5	3.003.000	5,2	49,1
5	Kokerei*	3	2.245.333	3,9	100,0
6	Behandlung und Beseitigung nicht gefährlicher Abfälle	4	2.072.000	3,6	48,8
7	Herstellung von Zement	2	880.000	1,5	15,6
8	Herstellung von sonstigen anorganischen Grundstoffen und Chemikalien	1	797.000	1,4	58,2
9	Erzeugung und erste Bearbeitung von Aluminium	2	431.000	0,7	47,5
10	Herstellung von Farbstoffen und Pigmenten	1	367.000	0,6	65,8

\* Kokerei Bottrop mit Werten aus dem Jahr 2017

Quelle: Umweltbundesamt (2020c)

Noch deutlicher fällt das Ergebnis aus, wenn anstatt der Branchen die Tätigkeiten betrachtet werden, die im PRTR ebenfalls dargestellt sind (siehe Tabelle 3-7). Die Unterschiede ergeben sich daraus, dass größere Industrieunternehmen eigene Kraftwerke zur Stromerzeugung betreiben:

- ▶ Im Ruhrgebiet entstehen 51,6 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Verbrennungsanlagen, die Energie von mehr als 50 Megawatt erzeugen.
- ▶ Dahinter trägt die Herstellung von Roheisen oder Stahl einschließlich Stranggießen zu 23,1 Prozent des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei. Der übrige CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Wirtschaftszweigs entfällt auf die Tätigkeiten Energieerzeugung und Kokereien.
- ▶ Die Mineralöl- und Gasraffinerien stoßen 6,3 Prozent und die Chemieanlagen zur industriellen Herstellung von organischen Grundchemikalien 4,1 Prozent des CO<sub>2</sub> im Ruhrgebiet aus.

**Tabelle 3-7: CO<sub>2</sub>-Emissionen im Ruhrgebiet in der Industrie nach Tätigkeit im Jahr 2018**

Rang	Tätigkeit	Anzahl Betriebe	CO <sub>2</sub> -Ausstoß in Tonnen	Anteil am Ruhrgebiet in %	Anteil an NRW in %
1	Verbrennungsanlagen > 50 MW	16	29.926.000	51,6	43,2
	Herstellung von Roheisen oder Stahl einschl. Stranggießen	7	13.390.000	23,1	100,0
2	> 2,5 t/h				
3	Mineralöl- und Gasraffinerien	2	3.660.000	6,3	50,0
4	Herstellung von Basiskunststoffen	1	2.390.000	4,1	100,0
5	Kokereien	3	2.245.333	3,9	100,0
	Verbrennung nicht gefährlicher Abfälle > 3 t/h	4	2.072.000	3,6	33,3
6	Zementklinkerherstellung in Drehrohröfen > 500 t/d	2	880.000	1,5	20,0
7	Chemieanlagen zur industriellen Herstellung von anorganischen Grundchemikalien	1	797.000	1,4	50,0
8	Gewinnung von Nichteisenmetallen aus Erzen	3	598.000	1,0	75,0
9	Herstellung von Glas und Glasfasern > 20 t/d	2	367.000	0,6	50,0

\* Kokerei Bottrop mit Werten aus dem Jahr 2017

Quelle: Umweltbundesamt (2020c)

### CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs im Ruhrgebiet

Die Menschen im Ruhrgebiet tragen im Bereich Verkehr zu 28,4 Prozent der CO<sub>2</sub>-Verkehrsemissionen des Landes bei. Ausgehend von den 32 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>, die der Verkehr im Jahr 2018 in NRW ausgestoßen hat, gehen im Ruhrgebiet 9,1 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> auf den Verkehr zurück. Über 90 Prozent dieser Freisetzungen gehen auf den Straßenverkehr zurück.

Der Bestand an Kraftfahrzeugen gibt Auskunft über die Art der vorhandenen Fahrzeuge. Im Ruhrgebiet gab es am 1. Januar 2020 laut Kraftfahrt-Bundesamt (2020) 3,2 Millionen Kraftfahrzeuge. Darunter waren

- ▶ 2,8 Millionen Personenkraftwagen,
- ▶ 232.000 Krafträder,
- ▶ 162.000 Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen,
- ▶ 4.500 Omnibusse und
- ▶ 34.500 sonstige Kraftfahrzeuge.

Die Verteilung auf die einzelnen Arten ist ähnlich wie in Nordrhein-Westfalen, wenngleich der Anteil landwirtschaftlicher Zugmaschinen etwas geringer und der Anteil der Pkw dafür etwas höher ausfällt.

Die CO<sub>2</sub>-Belastung durch den Verkehr hängt nicht nur von der Zahl der verschiedenen Fahrzeugarten ab, sondern auch von der Motortechnik und den gefahrenen Kilometern. So stößt ein neues Pkw-Modell der Kompaktklasse mit Benzinmotor je nach Motorisierung pro Kilometer zwischen 110 und 140 Gramm CO<sub>2</sub> aus. Um die Jahrtausendwende lag der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Kompaktklasserfahrzeuge noch zwischen 160 und 210 Gramm. Bei geschätzten 35 Milliarden Pkw-Fahrzeugkilometern im Ruhrgebiet führt die Motortechnik zu erheblichen Einsparungen. Auch in allen anderen Fahrzeugklassen hat es Verbesserungen beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegeben. Allerdings sind diese Verbesserungen durch mehr gefahrene Kilometer überkompensiert worden, sodass die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors entgegen dem Trend gestiegen sind. Fahrzeuge mit Wasserstofftechnik können diesen Kreis durchbrechen, da sie während der Fahrt kein CO<sub>2</sub> freisetzen und ihr Betrieb völlig emissionsfrei ist, wenn der Wasserstoff aus erneuerbarer Energie gewonnen wurde.

An automatischen Zählstellen wird die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (alle Tage, beide Fahrrichtungen zusammen) gemessen. Im Jahr 2018 zeigte sich dabei folgendes Bild (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2020):

- ▶ Im Ruhrgebiet wurden täglich auf den Autobahnen 2.141.004 Kraftfahrzeuge und auf den Bundesstraßen 210.337 Kraftfahrzeuge gezählt.
- ▶ In ganz Nordrhein-Westfalen wurden auf den Autobahnen 9.026.957 und auf den Bundesstraßen 1.305.063 Kraftfahrzeuge am Tag gezählt.
- ▶ Am gemessenen Autobahnverkehr hatten die Zählstellen im Ruhrgebiet einen Anteil von 23,7 Prozent, auf den Bundesstraßen von 16,1 Prozent an den Kraftfahrzeugen.
- ▶ Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs (alle Tage, beide Fahrrichtungen zusammen) lag im Ruhrgebiet auf den Autobahnen bei 275.221 und auf Bundesstraßen bei 16.055 Fahrzeugen.
- ▶ In Nordrhein-Westfalen wurden an den automatischen Zählstellen auf den Autobahnen täglich 1.074.756 und auf den Bundesstraßen 87.701 Schwerverkehrsfahrzeuge gezählt.
- ▶ Beim Schwerverkehr auf den Autobahnen hatten die Zählstellen im Ruhrgebiet einen Anteil von 25,6 Prozent, auf den Bundesstraßen von 18,3 Prozent.

Die automatische Verkehrszählung stellt nur einen Ausschnitt des Verkehrs dar und wird regelmäßig durch eine händische Verkehrszählung ergänzt. Die derzeit aktuelle Verkehrszählung stammt aus dem Jahr 2015 (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2017) und zeigt für die Autobahnen folgendes Bild:

- ▶ Im Ruhrgebiet wurden täglich auf den Autobahnen 13.560.400 Kraftfahrzeuge gezählt, darunter 1.418.320 Schwerverkehrsfahrzeuge.
- ▶ In ganz Nordrhein-Westfalen wurden auf den Autobahnen 36.580.100 Kraftfahrzeuge am Tag erfasst, davon 4.180.738 Schwerverkehrsfahrzeuge.
- ▶ Am gesamten gemessenen Autobahnverkehr in Nordrhein-Westfalen wurden im Ruhrgebiet 37,1 Prozent aller Kraftfahrzeuge und 33,9 Prozent aller Schwerverkehrsfahrzeuge erfasst.

# 4 Dekarbonisierung: Wasserstofftechnologie als wichtiger Lösungsansatz

## 4.1 Wasserstofftechnologie und ihre Anwendungsmöglichkeiten

Wasserstoff (H<sub>2</sub>) kann in der Regel nicht einfach in der Natur gewonnen, sondern muss hergestellt werden. Dazu gibt es verschiedene Verfahren, die mit unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen einhergehen. In der öffentlichen Diskussion wird Wasserstoff häufig durch verschiedene Farben klassifiziert (Bundesnetzagentur, 2020):

- ▶ Grüner Wasserstoff wird mittels Wasserelektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt, wobei die Wassermoleküle unter Nutzung elektrischer Energie in die Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten werden.
- ▶ Anthrazitfarbener Wasserstoff wird mittels Wasserelektrolyse hergestellt, wobei der genutzte Strom nicht „weit überwiegend“ aus erneuerbaren Energien, sondern aus dem vorhandenen Strommix verwendet wird.
- ▶ Grauer Wasserstoff wird derzeit hauptsächlich für den industriellen Bedarf mittels Dampfreformierung aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern und Wasser hergestellt. In der Regel wird Erdgas verwendet. Grauer Wasserstoff wird schon seit Jahrzehnten in Deutschland hergestellt und in aller Regel sehr nah am Herstellungsort verbraucht.
- ▶ Blauer Wasserstoff wird mittels Dampfreformierung erzeugt, das entstehende CO<sub>2</sub> wird aber abgetrennt und per Carbon Capture and Storage (CCS) gelagert.
- ▶ Türkiser Wasserstoff wird mittels Methanpyrolyse – bislang nur Pilotanlagen – erzeugt, wobei Methankohlenstoff (Grafit) und Wasserstoff aufgespalten wird. Statt CO<sub>2</sub> entsteht ein fester Rohstoff, den die Industrie weiterverarbeiten könnte. Die Methanpyrolyse benötigt weniger Energie als die Wasserelektrolyse.
- ▶ Wasserstoff als Kuppel- oder Nebenprodukt entsteht bei unterschiedlichen Prozessen, zum Beispiel in der chemischen Industrie. Dieser Wasserstoff wird zumindest teilweise in weiteren Prozessen verwendet.
- ▶ Weißer Wasserstoff ist der einzige Wasserstoff, der nicht industriell hergestellt werden muss, sondern in der Natur in porösen Gesteinsschichten lagert und durch Bohrungen gewonnen werden

kann. Lagerstätten liegen beispielsweise in Afrika. So reichen die in Mali bereits heute bekannten weißen Wasserstoffvorkommen aus, um einen Konzern wie thyssenkrupp rund 100 Jahre mit Wasserstoff zu versorgen, der in der CO<sub>2</sub>-neutralen Stahlproduktion (siehe unten) gebraucht wird (Wetzel, 2020).

In Deutschland werden seit Jahrzehnten vor allem grauer Wasserstoff sowie Wasserstoff als Kuppel- bzw. Nebenprodukt hergestellt und sehr nah am Herstellungsort verbraucht. Der Verbrauch erfolgt bislang fast ausschließlich in Industrieprozessen, beispielsweise als Grundstoff zur Produkterzeugung in der Methanol- und Ammoniakherstellung sowie in Raffinerien (Entschwefelung von Kohlenwasserstoffen und Hydrocracken). Im Jahr 2015 wurden dazu 71 Terawattstunden (unterer Heizwert; TWh<sub>HU</sub>) benötigt. Grundsätzlich bietet der bislang bestehende Wasserstoffbedarf Potenzial für die Ersetzung durch Power-to-X-Verfahren und damit zur CO<sub>2</sub>-Reduktion. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der Großteil des Wasserstoffbedarfs als Kuppel- oder Nebenprodukt anfällt und nur circa 40 Prozent über Dampfreformierung als grauer Wasserstoff hergestellt werden, die durch grünen Wasserstoff ersetzt werden können (FfE, 2017).

Wasserstoff (H<sub>2</sub>) kommt bei der geplanten Energiewende und der Dekarbonisierung eine zentrale Rolle zu, da er vielseitig eingesetzt werden kann (Deutscher Bundestag, 2020):

- ▶ Als Energieträger kann er in Brennstoffzellen in der wasserstoffbasierten Mobilität und zukünftig als Basis für synthetische Kraft- und Brennstoffe genutzt werden.
- ▶ Als Energiespeicher kann er flexibel erneuerbare Energien speichern und einen Beitrag zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage erneuerbarer Energien leisten. Als Energiespeicher und -träger ist Wasserstoff ein wesentliches Element in der Sektorkopplung. Wo Strom aus erneuerbaren Energien nicht direkt eingesetzt werden kann, öffnen grüner Wasserstoff und seine Folgeprodukte (Power-to-X) neue Dekarbonisierungspfade.
- ▶ Als Grundstoff wird Wasserstoff bereits heute benötigt, beispielsweise in der Ammoniakherstellung. Künftig soll der bereits heute verwendete fossil erzeugte Wasserstoff ersetzt werden. Wasserstoff kann darüber hinaus durch die Verwendung als Grundstoff weitere Produktionsprozesse in der Industrie dekarbonisieren, für die nach derzeitigem Stand der Technik keine anderen Dekarbonisierungstechnologien zur Verfügung stehen. Beispiel hier ist die Stahlerzeugung, bei der die Reduktionsprozesse derzeit noch mit Kokskohle erfolgen. Bestimmte prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie in der Zementindustrie, lassen sich mit Wasserstoff zumindest neutralisieren, wenn das CO<sub>2</sub> abgefangen und mit Wasserstoff in verwertbare Chemikalien umgewandelt (CCU: Carbon Capture and Utilization) und anschließend in einer Kreislaufwirtschaft immer wieder erneut eingesetzt wird.
- ▶ Industrie: In der Industrie können bestimmte Bereiche nur mit neuen Technologien CO<sub>2</sub>-frei werden, beispielsweise die Stahlerzeugung. In der Chemieindustrie und in Raffinerien kann CO<sub>2</sub>-intensiv erzeugter Wasserstoff durch CO<sub>2</sub>-frei erzeugten Wasserstoff ersetzt werden.
- ▶ Verkehr: Um seine sektoralen Klimaziele zu erreichen, muss der Verkehrssektor auf technologischen Fortschritt setzen. Die wasserstoff- und PtX-basierte Mobilität ist für solche Verkehrsanwendungen eine Alternative, bei denen der direkte Einsatz von Elektrizität nicht sinnvoll oder technisch nicht machbar ist. Brennstoffzellen können in Personenkraftwagen, im öffentlichen Personennahverkehr (Busse, Züge), in Teilen des Straßenschwerlastverkehrs (Lkw) sowie bei Nutzfahrzeugen (beispielsweise Baustellenfahrzeugen) eingesetzt werden. Auch in der Logistik (Lieferverkehr und andere Nutzfahrzeuge wie Gabelstapler) können Brennstoffzellenfahrzeuge die batterieelektrische Mobilität ergänzen. Voraussetzung für den Einsatz im Straßenverkehr ist der bedarfsgerechte Aufbau der erforderlichen Tankinfrastruktur (Deutscher Bundestag, 2020). Im Luft- und Seeverkehr können langfristig klimaneutrale Treibstoffe zum Einsatz kommen, welche auf wasserstoffbasierten Energieträgern aus PtX-Verfahren basieren. Strombasierte synthetische flüssige Kraftstoffe haben den Vorteil, unmittelbar in der bestehenden Verteilinfrastruktur und im

Fahrzeugbestand eingesetzt werden zu können. Im Luftverkehr sowie in der Küsten- und Binnenschifffahrt können auch Brennstoffzellen sowie batterieelektrische Antriebe zur Anwendung kommen, wobei die technische Entwicklung noch abgewartet werden muss (Deutscher Bundestag, 2020).

- ▶ Wärme/Gebäude: Bei der Prozesswärme wird kurz- und mittelfristig auf das Ausschöpfen der Effizienz- und Elektrifizierungspotenziale gesetzt, gleichwohl wird langfristig ein Bedarf an gasförmigen Energieträgern wie Wasserstoff gesehen. Im Gebäudesektor steht derzeit die Ausschöpfung von Effizienzpotenzialen (zum Beispiel Gebäudedämmung) und Elektrifizierungspotenzialen (zum Beispiel Geothermienutzung) im Vordergrund. Gleichwohl wird auch im Gebäudesektor ein Bedarf an gasförmigen Energieträgern bestehen bleiben. Hier kann Wasserstoff langfristig einen Beitrag zur Dekarbonisierung von Teilen des Wärmemarkts leisten (Deutscher Bundestag, 2020).

Auch die Landespolitik in Nordrhein-Westfalen setzt auf Wasserstoff. Ein Positionspapier von IN4climate.NRW, einer Initiative des Landes NRW, geht davon aus, dass eine weitgehend treibhausgasneutrale Wirtschaft nicht ohne die direkte und indirekte Nutzung von CO<sub>2</sub>-frei erzeugtem Wasserstoff möglich ist (IN4climate.NRW, 2019). Wasserstoff wird nach der Wasserstoffstudie NRW (LBST, 2019) als universeller Energieträger ebenfalls eine bedeutende Rolle in allen drei Verbrauchssektoren spielen:

- ▶ In der Industrie findet Wasserstoff als Brennstoff zur Bereitstellung von Prozesswärme und als Grundstoff zur weiteren stofflichen Nutzung (zum Beispiel in der chemischen Industrie oder Stahlindustrie) Verwendung.
- ▶ Im Gebäudesektor wird mit Wasserstoff Wärmeenergie erzeugt, entweder mit Brennkesseln oder lokalen Brennstoffzellensystemen.
- ▶ Im Verkehrssektor findet Wasserstoff als Kraftstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEVs) Anwendung.

Die Power-to-Gas-Technologie mit der Wasser-Elektrolyse stellt das wesentliche Bindeglied zwischen dem Strom- und Wasserstoffsystem dar. Mit Strom aus erneuerbaren Energien kann grüner Wasserstoff für die einzelnen Verbrauchssektoren hergestellt werden, der zur Stabilisierung des Stromnetzes beiträgt, da einerseits Überschussenergie in Wasserstoff umgewandelt werden und Wasserstoff in Gasturbinen- und Brennstoffzellensystemen Strom im Falle zu geringer Wind- und Solarkraft erzeugen kann.

## 4.2 Wasserstoffbedarfe der Zukunft

Die Bundesregierung sieht in ihrer Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030 einen Wasserstoffbedarf von circa 90 bis 110 TWh, gegenüber dem heutigen Bedarf von rund 70 TWh eine Steigerung um rund 30 bis 60 Prozent. Bis zum Jahr 2030 sollen in Deutschland Erzeugungsanlagen einer grünen Wasserstoffproduktion von bis zu 14 TWh (einschließlich der dafür erforderlichen Offshore- und Onshore-Energiegewinnung) entstehen. Für den Zeitraum bis zum Jahr 2035, spätestens aber bis 2040, soll die Kapazität nochmals verdoppelt werden.

Für den zukünftigen Bedarf an Wasserstoff liegen mehrere Szenarien vor, von denen nachfolgend die ersten beiden näher betrachtet werden. Letztlich zeigen alle der genannten Studien auf, dass Wasserstoff in Zukunft erheblich an Bedeutung gewinnen wird:

- ▶ Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST) (2019), Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Eine Expertise für das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
- ▶ Fraunhofer (2019), Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland
- ▶ Umweltbundesamt (2019), Rescue-Studie – Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, Climate Change 36/2019
- ▶ Deutsche Energie-Agentur (dena) (2018), Leitstudie integrierte Energiewende – Teil B: Gutachterbericht von ewi Energy Research & Scenarios gGmbH im Auftrag der dena
- ▶ Bundesverband der Deutschen Industrie (2018), Klimapfade für Deutschland. Boston Consulting Group und Prognos im Auftrag des BDI

In allen genannten Studien wird eine Vielzahl von Parametern festgelegt, um die Energie- und Wasserstoffbedarfe zu ermitteln. Diese reichen beispielsweise in der Wasserstoffstudie NRW von den durch erneuerbare Energien erzeugten Strommengen über die Bedarfe der verschiedenen Sektoren bis hin zur Entwicklung der eingesetzten Technologien. Die Wasserstoffstudie NRW greift dabei auf die Annahmen der dena-Leitstudie 2018 zurück (Deutsche Energie-Agentur (dena)/EWI, 2018), beispielsweise zur Bevölkerungsentwicklung, dem wirtschaftlichen Wachstum, der Verkehrsentwicklung oder die Energieeffizienz der Technologien. Zudem finden Szenarien der International Energy Agency zur Entwicklung der Energiepreise verschiedener Energieträger (International Energy Agency, 2017a) und die sektorale Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen aus dem Klimaschutzplan der Bundesregierung (Bundesumweltministerium, 2020c) Eingang in die Szenarien der Wasserstoffstudie NRW (LBST, 2019). Die Komplexität wird durch die Einbindung weiterer Simulationen wie den Netzentwicklungsplan Strom weiter erhöht. Das verwendete, komplexe Simulationsmodell enthält zudem Regionen und erlaubt die Entwicklung einer Vielzahl von Szenarien sowie Sensitivitätsanalysen. Bei den Regionen wird Deutschland in fünf Regionen (NRW, Nord, West, Ost, Süd) und Nordrhein-Westfalen wiederum in sechs Regionen unterteilt, darunter das Ruhrgebiet.

In der Wasserstoffstudie NRW werden zwei Ausprägungen der Energieversorgung und drei Ausprägungen der Einsparziele bei Treibhausgasen betrachtet. Unterschieden wird zwischen der Energieversorgung durch den Energieträger Strom mit geringer Wasserstoffnachfrage und Wasserstoffherzeugung am Ort des Verbrauchs sowie der Energieversorgung durch Strom und Wasserstoff mit hohem Wasserstoffverbrauch und Wasserstoffherzeugung an Orten mit viel erneuerbaren Energien und Leitungstransport zum Verwendungsort. Die Einsparziele bei Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> gegenüber dem Jahr 1990 werden in drei Ausprägungen betrachtet: 55 Prozent weniger bis zum Jahr 2030 sowie 80 bzw. 95 Prozent weniger bis zum Jahr 2050. Anschließend werden die Ausprägungen zu sechs Szenarien kombiniert und der Wasserstoffbedarf aus Elektrolyse ermittelt (siehe Tabelle 4-1). Der Bedarf liegt in den Szenarien zwischen knapp 20 und 160 Terawattstunden, was 20 bis 30 Prozent des deutschlandweiten Bedarfs entspricht. Im Szenario H<sub>2</sub> 2050 -95% werden 29 Prozent als Grundstoff in der Industrie, 21 Prozent als Brennstoff in der Industrie, 24 Prozent im Gebäudesektor und 26 Prozent im Verkehrssektor eingesetzt. Die stoffliche Nutzung von Wasserstoff in industriellen Prozessen macht in Nordrhein-Westfalen im Szenario EL 2050 -80% rund die Hälfte und im Szenario EL 2050 -95% rund zwei Drittel der gesamten H<sub>2</sub>-Nachfrage in NRW aus (LBST, 2019).

**Tabelle 4-1: Erwartete jährliche Wasserstoffbedarfe aus der Elektrolyse in TWh**

		Technologie*	
		Elektrifizierung und geringer Bedarf an Wasserstoff; keine Wasserstoffinfrastruktur	Nutzung von Wasserstoff in allen Sektoren; mit Wasserstoffinfrastruktur
Emissionsminderungsziel gegenüber 1990	-55 % bis 2030	EL 2030: 18 TWh	H <sub>2</sub> 2030: 72 TWh
	-80 % bis 2050	EL 2050 -80%: 49 TWh	H <sub>2</sub> 2050 -80%: 124 TWh
	-95 % bis 2050	EL 2050 -95%: 72 TWh	H <sub>2</sub> 2050 -95%: 157 TWh

\* EL: Elektrifizierung; H<sub>2</sub>: Wasserstoff

Quelle: LBST (2019)

Der Wasserstoffbedarf wird in der Wasserstoffstudie NRW auch für das Ruhrgebiet ausgewiesen. Die höheren Anteile am NRW-Bedarf in den Elektrifizierungsszenarien 2050 weisen auf die höhere Bedeutung des Wasserstoffs in der industriellen Nutzung im Ruhrgebiet hin:

- ▶ EL 2030: 3 TWh (17 Prozent des NRW-Bedarfs)
- ▶ H<sub>2</sub> 2030: 12 TWh (17 Prozent des NRW-Bedarfs)
- ▶ EL 2050 -80%: 25 TWh (61 Prozent des NRW-Bedarfs)
- ▶ H<sub>2</sub> 2050 -80%: 41 TWh (33 Prozent des NRW-Bedarfs)
- ▶ EL 2050 -95%: 46 TWh (64 Prozent des NRW-Bedarfs)
- ▶ H<sub>2</sub> 2050 -95%: 63 TWh (40 Prozent des NRW-Bedarfs)

Das Ruhrgebiet gewinnt langfristig Anteile an der Wasserstoffnutzung hinzu. Dahinter steht die Umstellung ausgewählter industrieller Prozesse auf Wasserstoff. Vor allem die Umstellung der Stahlindustrie auf Direktreduktionsverfahren (siehe Kapitel 5.1) ist Treiber des wachsenden Wasserstoffbedarfs des Ruhrgebiets. Demnach benötigt die Stahlindustrie im Ruhrgebiet im Jahr 2050 pro Jahr rund 21 bis 41 TWh Wasserstoff, sodass für diese Region der größte Anteil am H<sub>2</sub>-Bedarf in NRW prognostiziert wird. Dies unterstreicht nach der Wasserstoffstudie NRW die besondere Rolle der Stahlindustrie im Hinblick auf die potenzielle Nutzung von Wasserstoff in Nordrhein-Westfalen. Die stoffliche Nutzung von Wasserstoff durch die chemische Industrie und Raffinerien wird nach der Wasserstoffstudie NRW vor allem in der Region Köln (1,9 TWh/a) und im Ruhrgebiet (0,3 TWh/a) erfolgen. Auch im Verkehrssektor steigt die Wasserstoffnachfrage an, vor allem im Ruhrgebiet.

Die Fraunhofer (2019)-Wasserstoff-Roadmap für Deutschland zeigt Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff auf, wertet verschiedene Szenarien zum Wasserstoffbedarf im Jahr 2050 aus und hat eigene Szenarien zu den Wasserstoffbedarfen benannt. Demnach weist Wasserstoff besonders große Potenziale beim Einsatz in der Stahlindustrie und der chemischen Industrie auf. In der Stahlindustrie können demnach prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden, wenn auf ein wasserstoffbasiertes Verfahren umgestellt wird. In der chemischen Industrie kann beispielsweise in der Ammoniakherstellung fossil erzeugter Wasserstoff durch grünen Wasserstoff ersetzt werden. In allen Branchen kann Wasserstoff eine Rolle bei der Erzeugung von Prozessdampf auf höheren Temperaturniveaus spielen, wenn Wasserstoff in Form von synthetischem Erdgas als direktes Erdgassubstitut verwendet wird. Diese Umstellung erfordert keine Anpassung der industriellen Anlagentechnik, allerdings sind die Kosten der PtG-Erzeugung und die Kreislaufführung des Kohlenstoffs zu klären. Die in den betrachteten Studien ausgewiesenen Bedarfe weisen eine erhebliche Spannweite auf und sind abhängig von den Szenarien, die unterschiedliche Annahmen zu Technologien, Importen von Energieträgern und Zielen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion (85 bis 95 Prozent im Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 1990) enthalten. Für die Wasserstoff-Roadmap hat Fraunhofer daraus eigene Szenarien abgeleitet. Szenario A geht von einer weitgehenden Elektrifizierung aller Sektoren aus, mit nur geringen Anteilen an stofflichen Energieträgern. Szenario B

sieht hingegen den Einsatz größerer Anteile an stofflichen Energieträgern vor, wobei diese nicht mehr fossilen Ursprungs sind, sondern durch klimaneutrale gasförmige Energieträger wie Wasserstoff und synthetisches Methan gedeckt werden. Die in Deutschland erwartete Wasserstoffnachfrage liegt demnach in Deutschland im Jahr 2030 zwischen 4 und 20 TWh und im Jahr 2050 zwischen 250 und 800 TWh. Dieser Bedarf kann trotz des angenommenen Ausbaus der Elektrolysekapazitäten nicht aus heimischer Produktion gedeckt werden.

Die für die Energiewende voraussichtlich benötigten Mengen an Wasserstoff werden aus heutiger Sicht nicht ausschließlich in Deutschland produziert werden können, da die erneuerbaren Erzeugungskapazitäten innerhalb Deutschlands begrenzt sind (Deutscher Bundestag, 2020). Um den zukünftigen Bedarf zu decken, wird der überwiegende Teil der Wasserstoffnachfrage importiert werden müssen und kann nicht ausschließlich mit einer lokalen Erzeugung von grünem Wasserstoff gedeckt werden, wobei hier einige EU-Staaten (Nord-/Ostseeanrainer, Südeuropa) gute Voraussetzungen haben. Auch der weiße Wasserstoff, beispielsweise auf Afrika, bietet Optionen für die Wasserstoffimporte.

Der Markthochlauf setzt eine entsprechende Transport- und Verteilinfrastruktur voraus. Die Orte der Erzeugung, an denen viel erneuerbare Energie produziert wird, und der Verwendung, an denen weniger erneuerbare Energien erzeugt werden können, fallen auseinander. Da der Transport elektrischer Energie mit mehr Verlusten verbunden ist als der Transport von Wasserstoff, ist der Transport von Wasserstoff vorzuziehen. Deutschland verfügt zwar mit seinem weit verzweigten Erdgasnetz und den angeschlossenen Gasspeichern über eine gut ausgebaute Infrastruktur für Gase, gleichwohl muss das Wasserstoffnetz weiter aus- und zugebaut werden (Deutscher Bundestag, 2020).

Der Transport von Wasserstoff erfolgt durch Leitungsnetze. Dabei wird ein reines Wasserstoffnetz parallel zum Gasnetz erforderlich, da der Beimischung ins Gasnetz Grenzen gesetzt sind und reiner Wasserstoff benötigt wird. Hier gibt es laut Bundesnetzagentur drei verschiedene Szenarien (Bundesnetzagentur, 2020):

- ▶ Szenario 1: Lokale Inselnetze mit Verbrauch der Industrie und Erzeugung ausschließlich in den Verbrauchszentren
- ▶ Szenario 2: Lokale Inselnetze und einzelne lange Transportleitungen mit Verbrauch der Industrie und Erzeugung auch außerhalb der Verbrauchszentren
- ▶ Szenario 3: Engmaschige Verteilernetze und einzelne lange Transportleitungen mit Verbrauch in der Industrie und dem Verkehr sowie Erzeugung an verschiedenen Standorten

Szenario 1 entspricht dem Status quo, wird aber beim Markthochlauf von Wasserstofftechnologien nicht funktionieren, da zu wenig Wasserstoff aus erneuerbaren Energien im Ruhrgebiet erzeugt werden kann. Szenario 3 erfordert die höchsten Investitionen und ist eher langfristig denkbar. Szenario 2 ist für das Ruhrgebiet relevant, da dort bereits das größte lokale Inselnetz für Wasserstoff in Deutschland vorhanden ist. Hinzukommen müssten eine oder mehrere lange Transportleitungen, um grünen Wasserstoff ins Ruhrgebiet zu transportieren.

### 4.3 Wertschöpfungspotenziale der Wasserstofftechnologie

Ein Ziel der nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung ist die Schaffung neuer Wertschöpfungsketten für die deutsche Wirtschaft (Deutscher Bundestag, 2020). Die Anwendung der Wasserstofftechnologie trägt nicht nur zur Erreichung von Klimaschutzzielen bei, sondern auch zu industriepolitischen Zielen. Durch die frühzeitige Entwicklung der Wasserstofftechnologie können Wettbewerbsvorteile erreicht und Exportchancen verbessert werden, zumal Deutschland derzeit entlang der

gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette, von der Erzeugung bis zur Nutzung durch die Brennstoffzelle oder Weiterverarbeitung zu synthetischen Kraft- und Brennstoffen, gut aufgestellt ist. So schätzt Fraunhofer die mögliche jährliche Wertschöpfung für die deutsche Industrie bei der Erzeugungstechnologie auf etwa 5,5 Milliarden Euro. Bei der Nutzungstechnologie in Brennstoffzellen im Verkehr wird die jährliche Wertschöpfung auf 2,4 Milliarden Euro bis 2030 und etwa 26 Milliarden Euro im Zeitraum 2040 bis 2050 geschätzt (Fraunhofer, 2019).

Bereits heute ist Deutschland einer der weltweit größten Exporteure von Elektrolyseanlagen. Nach Berechnungen des Instituts der deutschen Wirtschaft und frontier economics kann Deutschland durch die Wasserstofftechnologie ein Wertschöpfungspotenzial von rund 36 Milliarden Euro jährlich heben und bis zu 470.000 zusätzliche Arbeitsplätze in Deutschland schaffen (Institut der deutschen Wirtschaft/frontier economics, 2018).

Nordrhein-Westfalen kann aufgrund seiner zentralen Lage in Europa und seiner Potenziale in Industrie und Forschung Modellregion für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft werden. Große Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale werden bei Herstellung, Transport und Nutzung von klimafreundlichem Wasserstoff und Export dieser Technologien auf einem internationalen Wasserstoffmarkt gesehen. Für NRW wird demnach ein Wertschöpfungspotenzial in Milliardenhöhe erwartet. In der Wasserstoffstudie NRW wird für die verschiedenen Szenarien (siehe oben) das jährliche Wertschöpfungspotenzial für Deutschland und für Nordrhein-Westfalen in Milliarden Euro geschätzt (LBST, 2019):

- ▶ EL 2030: D: 9,0 Milliarden Euro / NRW: 1,4 Milliarden Euro
- ▶ H<sub>2</sub> 2030: D: 35,0 Milliarden Euro / NRW: 4,3 Milliarden Euro
- ▶ EL 2050 -80%: D: 12,0 Milliarden Euro / NRW: 2,4 Milliarden Euro
- ▶ H<sub>2</sub> 2050 -80%: D: 39,0 Milliarden Euro / NRW: 4,5 Milliarden Euro
- ▶ EL 2050 -95%: D: 42,0 Milliarden Euro / NRW: 10,0 Milliarden Euro
- ▶ H<sub>2</sub> 2050 -95%: D: 49,0 Milliarden Euro / NRW: 6,4 Milliarden Euro

Die Wertschöpfungspotenziale in Nordrhein-Westfalen folgen in weiten Teilen den Trends in Deutschland. In den Wasserstoffszenerarien sind die Wertschöpfungspotenziale meist höher als in den Elektrifizierungsszenarien. Eine Ausnahme stellen in NRW die Szenarien 2050 -95% dar: Das Elektrifizierungsszenario bietet hier höhere Wertschöpfungspotenziale, da die Wasserstoffelektrolyseure und -speicher – anders als im Wasserstoffszenerario – verbrauchsnahe errichtet werden und NRW einen hohen Wasserstoffbedarf hat (LBST, 2019).

Insgesamt bietet die Wasserstofftechnologie für Nordrhein-Westfalen und damit auch für das Ruhrgebiet nicht nur Potenziale zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, sondern auch wirtschaftliche Potenziale.

## 5 CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale im Ruhrgebiet

Ausgangspunkt im Ruhrgebiet sind 83.000.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Ansatzpunkte für ein erhebliches Einsparpotenzial bieten. CO<sub>2</sub> entsteht vor allem bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Dies erfolgt bei der Energieerzeugung, in der Industrie, im Verkehr oder bei der Wärmeerzeugung von Haushalten.

Die Einsparpotenziale werden in der Regel in Szenarien abgebildet, die auf umfassenden modellgestützten Berechnungen basieren. In dieser Studie werden für das Ruhrgebiet keine eigenen Modelle entwickelt. Vielmehr wird an die vorliegenden Modellrechnungen, insbesondere der Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST, 2019), angeknüpft, um die Einsparpotenziale für das Ruhrgebiet zu ermitteln. Dabei gehen die spezifischen Strukturen des Ruhrgebiets in die Szenarien ein.

In der Wasserstoffstudie NRW sind sechs Szenarien abgebildet. Darin gehen zwei Ausprägungen der Energieversorgung (Energieversorgung durch den Energieträger Strom mit geringer Wasserstoffnachfrage und Wasserstofferzeugung am Ort des Verbrauchs sowie Energieversorgung durch Strom und Wasserstoff mit hohem Wasserstoffverbrauch und Wasserstofferzeugung an Orten mit viel erneuerbaren Energien und Leitungstransport zum Verwendungsort) und drei Ausprägungen der Einsparziele bei den Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> gegenüber dem Jahr 1990 (55 Prozent weniger bis zum Jahr 2030/80 bzw. 95 Prozent weniger bis zum Jahr 2050) ein (Tabelle 5-1). Im Fokus dieser Studie steht eine treibhausgasneutrale Welt, die Stand heute das politische Ziel darstellt, weshalb vor allem die beiden Szenarien 2050 (-95%) EL und 2050 (-95%) H<sub>2</sub> interessieren. Gleichwohl werden auch die übrigen Szenarien abgebildet, um den Weg hin zu einer treibhausgasneutralen Welt zu beleuchten.

**Tabelle 5-1: Szenarien in der Wasserstoffstudie NRW**

Sechs Szenarien

	Jahr/Reduktionsziel					
	2030 (-55%)		2050 (-80%)		2050 (-95%)	
<b>Energieversorgung mit unterschiedlichen Ausprägungen* durch Strom und Wasserstoff</b>	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>
* EL: Elektrifizierung und geringer Bedarf an Wasserstoff; keine Wasserstoffinfrastruktur; H <sub>2</sub> : Nutzung von Wasserstoff in allen Sektoren; mit Wasserstoffinfrastruktur						
Quelle: LBST (2019)						

Im Folgenden werden Einsparpotenziale für die Bereiche Industrie (Stahl, chemische Industrie), Verkehr und Wärme vorgestellt. Ausgangspunkt sind die jeweiligen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die derzeit gemessen werden. Anschließend werden Ansätze zur Einsparung von CO<sub>2</sub> vorgestellt und die Einsparpotenziale für das Ruhrgebiet ermittelt. Dazu werden die getroffenen Annahmen erläutert, die den Einsparpotenzialen zugrunde liegen.

## 5.1 Energieerzeugung und Industrie

### Energieerzeugung

Verbrennungsanlagen mit einer Leistung von mehr als 50 Megawatt dienen in erster Linie der Stromerzeugung. Im Jahr 2018 stießen diese Anlagen im Ruhrgebiet 29.926.000 Tonnen CO<sub>2</sub> aus, rund 52 Prozent des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes aller Industrieanlagen im Ruhrgebiet. In Nordrhein-Westfalen betrug der Anteil der Energieerzeugung 68,5 Prozent (Umweltbundesamt, 2020c).

Die Energieerzeugung soll in den Szenarien von fossilen Energieträgern auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Vor allem die Wind- und Solarenergie sollen den Strombedarf decken. Der Einsatz von Wasserstoff in großem Maßstab ist nicht vorgesehen, da die Erzeugung grünen Wasserstoffs mit erneuerbaren Energien und die anschließende Rückverstromung nicht effizient sind.

Dennoch kann Wasserstoff zukünftig auch bei der Elektrizitätserzeugung eine Rolle spielen. Da Wind- und Solarenergie nicht kontinuierlich zur Verfügung stehen, muss Energie für Zeiten mit zu geringer Erzeugung erneuerbarer Energien gespeichert werden. Zudem müssen im Stromnetz Lastschwankungen ausgeglichen werden, da sonst das Stromnetz zusammenbricht und die Stromversorgung unterbrochen wird. Um dies zu verhindern, wird sogenannte Regelenergie benötigt, die aus regelbaren Kraftwerken stammt. Derzeit wird die Regelenergie in Kohle- und vor allem Gaskraftwerken erzeugt, die flexibel geregelt werden können. Zukünftig kann mit Wasserstoff in Gasturbinen- oder Brennstoffzellensystemen flexibel Regelenergie gewonnen werden, um das Stromnetz zu stabilisieren (LBST, 2019).

Der erforderliche Umfang der Regelenergie hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie der Speichermöglichkeit von Energie oder der Sektorkopplung und der zeitlichen Steuerung des Energieverbrauchs. In der Wasserstoffstudie NRW wird der jährliche Regelenergiebedarf im Szenario 2030 -55% noch auf rund 120 Terawattstunden geschätzt, im Szenario 2050 -95% nur noch auf 3 bis 24 Terawattstunden (LBST, 2019). In der Wasserstoffstudie NRW wird diese Regelenergie im Szenario 2050 -95% fast vollständig mit Wasserstoff erzeugt. Für das Ruhrgebiet, auf das rund 43 Prozent der nordrhein-

westfälischen Emissionen der Energieerzeugung entfallen (Umweltbundesamt, 2020c), liegt der Energiebedarf für Regelenergie im Szenario 2050 -95% bei 1 bis 10 TWh pro Jahr.

Die CO<sub>2</sub>-Reduktion ergibt sich aus der Verwendung von grünem Wasserstoff. Alternativ könnte auch Erdgas zur Erzeugung der Regelenergie genutzt werden. Würde der im Jahr 2050 erforderliche Regelenergiebedarf aus Erdgas statt Wasserstoff erzeugt, würden zusätzlich zwischen 262.000 und 1.923.000 Tonnen CO<sub>2</sub> anfallen.

### Stahlindustrie

Die Stahlherstellung ist eine der CO<sub>2</sub>-intensivsten Industriebranchen im Ruhrgebiet. Die gesamte Branche Eisen/Stahl stieß im Jahr 2018 in Nordrhein-Westfalen 22.042.000 Tonnen CO<sub>2</sub> aus, wobei darin auch die hütteneigenen Kraftwerke zur Energieerzeugung oder das Stranggießen berücksichtigt sind.

Beim Einsatz von Wasserstoff steht die Hochofenroute im Fokus, die bei der Stahlerzeugung neben der schrottbasierten Elektrostahlroute zum Einsatz kommt. Die Hochofenroute verursacht hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen, weil für die Reduktion von Eisenerzen zu Roheisen große Mengen Koks benötigt werden. Nicht zuletzt stehen deshalb die nordrhein-westfälischen Kokereien im Ruhrgebiet. Durch das Direktreduktionsverfahren kann das Eisenerz durch Erdgas oder Wasserstoff reduziert werden, wodurch CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden. Das Direct Reduced Iron kann anschließend in einem Elektrolichtbogenofen zu Stahl weiterverarbeitet werden (Fraunhofer, 2019). Diese Direktreduktionsroute wird von den großen Herstellern Deutschlands (thyssenkrupp, Salzgitter AG, ArcelorMittal) bei der Umstellung auf eine CO<sub>2</sub>-arme Stahlindustrie gegenüber weiteren möglichen Verfahren bevorzugt. Wird zusätzlich die in der Stahlerzeugung und -weiterverarbeitung benötigte Prozesswärme durch elektrische Energie statt durch kohlenstoffhaltige Energieträger gewonnen, können fast alle CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stahlherstellung vermieden werden (Fraunhofer, 2019). Die großen Stahlhersteller haben angekündigt, ihre Produktionsverfahren umzustellen:

- ▶ thyssenkrupp hat 2019 angekündigt, ab dem Jahr 2050 klimaneutral sein zu wollen. Bis zu diesem Jahr sollen auch die Wasserstoffroute und der Einsatz von grünem Wasserstoff ihre volle Wirksamkeit entfalten und den größten Beitrag zur direkten CO<sub>2</sub>-Vermeidung leisten. Bis zum Jahr 2030 sollen 30 Prozent weniger Emissionen ausgestoßen werden, wobei dabei neben der Wasserstoffroute das Projekt Carbon2Chem, bei dem Stahlwerksemissionen in Chemikalien mit CO<sub>2</sub>-Gehalt umgewandelt werden sollen, großtechnisch verfügbar gemacht werden soll. Zugleich bietet thyssenkrupp anderen Branchen wie der Zementindustrie Technologien zur Abscheidung und Speicherung oder Weiterverarbeitung von CO<sub>2</sub> an (thyssenkrupp, 2019).
- ▶ ArcelorMittal hat 2019 angekündigt, bis zum Jahr 2050 die treibhausgasneutrale Umstellung auf eine Stahlherstellung auf grüner Wasserstoffbasis zu vollziehen (ArcelorMittal, 2019a). Bis zum Jahr 2030 sollen 30 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden, allerdings noch ohne die vollständige Umstellung der Stahlherstellung auf grünen Wasserstoff (ArcelorMittal, 2019b).
- ▶ Salzgitter hat 2019 ebenfalls angekündigt, an einer schrittweisen Umstellung der kohlenstoffintensiven, konventionellen Stahlherstellung hin zur Direktreduktion mit einem zunehmenden Einsatz von Wasserstoff und dem Ziel einer Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 95 Prozent zu arbeiten (Salzgitter AG, 2019).

„Aus den Augen, aus dem Sinn“ – dieses Vorgehen löst keine Klimaherausforderungen in der Stahlindustrie. Daher ist eine Schließung der Stahlwerke in Deutschland keine Lösung, auch wenn auf einen Schlag in Deutschland viel weniger CO<sub>2</sub> ausgestoßen würde. Allerdings sind die Klimaherausforderungen globale Herausforderungen. Der Stahl, der nicht in Deutschland hergestellt wird, würde an anderen Orten der Welt hergestellt. Ob dort aber die Wasserstofftechnologie zur Stahlerzeugung erforscht

und zukünftig genutzt würde, bleibt mehr als fraglich. Daher sind Erforschung, Entwicklung und Nutzung der CO<sub>2</sub>-freien Stahlerzeugung in Deutschland wichtig zur Lösung der Klimaherausforderungen.

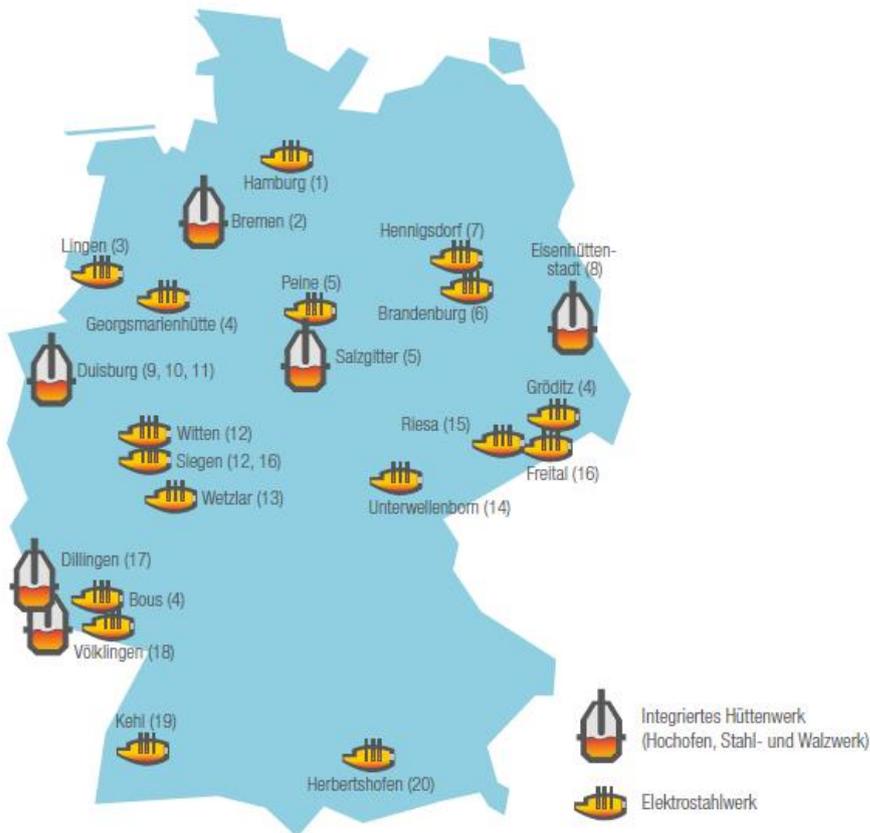
Welchen Beitrag Wasserstoff zur CO<sub>2</sub>-Reduktion beitragen kann, hängt von vielen Parametern ab, wie der Stahlnachfrage und den Anteilen von Primärstahl im Direktreduktionsverfahren und schrottbasiertem Elektro Stahl zur Befriedigung der Nachfrage. Fraunhofer schätzt auf Basis einer jährlichen Produktionsmenge von 29,5 Millionen Tonnen Primärstahl aus der Hochofenroute, dass die deutsche Stahlindustrie im Jahr 2030 einen Wasserstoffbedarf von 6 Terawattstunden (TWh) und im Jahr 2050 von 38 bis 56 TWh hat. Damit entfallen hohe Anteile des erwarteten gesamten Wasserstoffbedarfs auf die Stahlindustrie, die konzentriert an wenigen Standorten produziert. Da die erdgasbasierte Direktreduktionsroute technisch möglich ist und bereits heute weniger CO<sub>2</sub> ausstößt als die Hochofenroute, kann schon heute der Pfad hin zur CO<sub>2</sub>-neutralen Stahlherstellung genommen werden, ohne auf die Bereitstellung grünen Wasserstoffs angewiesen zu sein (Fraunhofer, 2019).

Im Jahr 2018 wurden in Deutschland 42,4 Millionen Tonnen Rohstahl hergestellt. Davon wurden rund 70 Prozent oder 29,7 Millionen Tonnen in der Hochofenroute erzeugt (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2019). Insgesamt gibt es in Deutschland sechs Standorte, an denen die Hochofenroute zum Einsatz kommt. Duisburg ist dabei der größte Standort, weitere Standorte finden sich im Saarland, in Salzgitter, in Bremen und in Eisenhüttenstadt (siehe Abbildung 5-1). Entsprechend entfallen auf das Ruhrgebiet rund 45 Prozent der deutschlandweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Branchen Herstellung von Roheisen oder Stahl einschließlich Stranggießen sowie Kokereien (Umweltbundesamt, 2020c).

Die Abschätzung der Einsparpotenziale im Ruhrgebiet in der Stahlindustrie findet ihren Anfang in der Stahlerzeugung über die Hochofenroute in Deutschland, nach Angaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl im Jahr 2018 rund 42,4 Millionen Tonnen Rohstahl, davon 70 Prozent aus der Hochofenroute. Nach Angaben der nordrhein-westfälischen Landesregierung entfallen 38 Prozent der deutschlandweiten Stahlproduktion auf Nordrhein-Westfalen (Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, 2020b). Die Hochofenroute verursacht nach Angaben der Wasserstoffstudie NRW 1,3 Tonnen CO<sub>2</sub> je Tonne Stahl, während die Elektroofenroute nur 0,007 Tonnen CO<sub>2</sub> je Tonne Stahl ausstößt (LBST, 2019). Daraus ergibt sich in Nordrhein-Westfalen ein CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 14.661.920 Tonnen aus der Hochofenroute. Dieser CO<sub>2</sub>-Ausstoß fällt vollständig im Ruhrgebiet an.

### Abbildung 5-1: Standorte der Stahlerzeugung

Hochofenroute und Elektroofenroute



- |                                    |                                    |                                  |
|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| (1) ArcelorMittal Hamburg          | (8) ArcelorMittal Eisenhüttenstadt | (15) ESF Elbe-Stahlwerke Feralpi |
| (2) ArcelorMittal Bremen           | (9) thyssenkrupp Steel Europe      | (16) BGH Edelstahl               |
| (3) Benteler                       | (10) HKM                           | (17) Dillinger Hüttenwerke       |
| (4) Georgsmarienhütte              | (11) ArcelorMittal Ruhrort         | (18) Saarstahl                   |
| (5) Salzgitter                     | (12) Deutsche Edelstahlwerke       | (19) Badische Stahlwerke         |
| (6) Brandenburger Elektrostahlwerk | (13) Buderus Edelstahl             | (20) Lech-Stahlwerke             |
| (7) Hennigsdorfer Elektrostahlwerk | (14) Stahlwerk Thüringen           |                                  |

Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl (2019)

Das Einsparpotenzial hängt von der Einführung der Primärstahlerzeugung im Direktreduktionsverfahren ab, das beim Einsatz von grünem Wasserstoff kein CO<sub>2</sub> verursacht. Die Wasserstoffstudie NRW trifft hierzu in den Szenarien unterschiedliche Annahmen, die mit verschiedenen Einsparpotenzialen einhergehen (siehe Tabelle 5-2):

- ▶ Die Szenarien unterscheiden sich in der Nutzung des Direktreduktionsverfahrens. Im Jahr 2030 kommt dieses noch nicht zur Anwendung, im Jahr 2050 erfolgen im Szenario mit dem Ziel einer 80-prozentigen Treibhausgasreduzierung 35 Prozent der Stahlerzeugung nach diesem Verfahren. Im Szenario mit der 95-prozentigen Treibhausgasreduzierung werden 70 Prozent des Rohstahls mit dem Direktreduktionsverfahren gewonnen, die übrigen 30 Prozent werden weiterhin in Elektroöfen geschmolzen.
- ▶ Die Einsparpotenziale aus der Hochofenroute liegen demnach in den Szenarien zwischen 7.330.960 Tonnen CO<sub>2</sub> (2050 -80%) und 14.661.920 Tonnen CO<sub>2</sub> (2050 -95%). Im Szenario 2050

(95-prozentige Treibhausgasreduzierung) erfolgt die Stahlherstellung CO<sub>2</sub>-frei, im Szenario 2050 (80-prozentige Treibhausgasreduzierung) wird die Hälfte der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart.

**Tabelle 5-2: Auswirkungen der Direktreduktion auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Stahlindustrie**

Anteil Produktionsverfahren an der gesamten Stahlerzeugung, absolute und relative Einsparung im Vergleich zum Jahr 2018 in den Szenarien der Wasserstoffstudie NRW

		Jahr/Szenario			
		2018	2030 -55 %	2050 -80 %	2050 -95 %
Anteil an Stahlerzeugung in Prozent	Hochofen	70 %	70 %	35 %	0 %
	Direktreduktion	0 %	0 %	35 %	70 %
	Elektro	30 %	30 %	30 %	30 %
<b>CO<sub>2</sub>-Einsparung im Ruhrgebiet durch Wasserstoffeinsatz in Tonnen</b>		-	-	-7.331.000	-14.662.000

Quelle: LBST (2018), eigene Berechnung

## Chemische Industrie

Die chemische Industrie produziert eine Vielzahl von Produkten, die in unterschiedlichem Maße direkt oder indirekt zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß beitragen. Insgesamt hat die chemische Industrie des Ruhrgebiets im Jahr 2018 – inklusive der Raffinerien – 7.827.000 Tonnen CO<sub>2</sub> ausgestoßen. Mit 47 Prozent (3.660.000 Tonnen) entfällt der Großteil auf die Raffinerien, gefolgt von den Herstellern von Basis kunststoffen (2.390.000 Tonnen) und den Herstellern anorganischer Grundchemikalien (797.000 Tonnen).

Die chemische Industrie und die Raffinerien sind bereits heute der größte Abnehmer von Wasserstoff. Oftmals ist der Wasserstoff ein Nebenprodukt aus anderen Prozessschritten, gleichwohl werden 20 bis 30 Prozent des Wasserstoffs mit fossilen Energieträgern gewonnen. Das Einsparpotenzial resultiert aus der Verwendung von grünem statt grauem Wasserstoff.

Zur Ermittlung der Einsparpotenziale der Chemieindustrie einschließlich der Raffinerien existieren keine konkreten Szenarien in der Wasserstoffstudie NRW. Daher erfolgt eine Abschätzung anhand verschiedener Angaben der Literatur. Im Fokus stehen dabei die Raffinerien. Ausgangspunkt ist die geografische Verteilung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der nordrhein-westfälischen Raffinerien, die knapp zur Hälfte im Ruhrgebiet erfolgt. Für die Ermittlung des Einsparpotenzials wird von einem Wasserstoffbedarf aus fossilen Energieträgern von knapp 180.000 Tonnen ausgegangen. Dies entspricht in etwa dem Wasserstoffbedarf der anderen Hälfte der nordrhein-westfälischen Raffinerien im Rheinland (IN4climate.nrw, 2019). Davon werden zwischen 20 und 30 Prozent heute mittels Erdgasdampfpreformation gewonnen. Im Ruhrgebiet werden in den Raffinerien demnach zwischen 34.600 und 51.900 Tonnen Wasserstoff mit der Erdgas-Dampfpreformation erzeugt. Dieser Prozess verursacht nach Angaben der Wasserstoffstudie NRW je Tonne Wasserstoff rund 9 Tonnen CO<sub>2</sub> (LBST, 2019) eine Größenordnung, von der auch andere Studien (zum Beispiel Wissmann et al., 2019) ausgehen.

Das Einsparpotenzial ergibt sich aus der Umstellung von grauem Wasserstoff aus der Erdgas-Dampfpreformation auf grünen Wasserstoff. Das abgeleitete CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial der Raffinerien im Ruhrgebiet liegt zwischen 311.596 und 467.394 Tonnen (Tabelle 5-3). Der übrige CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Raffinerien, wie er oben aufgezeigt wurde, ergibt sich aus dem Energiebedarf, unter anderem für Prozesswärme, bei dem die Wasserstofftechnologie zukünftig eine Rolle spielen kann (siehe unten).

**Tabelle 5-3: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial in Raffinerien durch Nutzung von grünem Wasserstoff**

In Tonnen

	Szenario 20 % H <sub>2</sub> aus Erdgas	Szenario 30 % H <sub>2</sub> aus Erdgas
<b>Bedarf an H<sub>2</sub> aus Dampfreformation</b>	34.622	51.933
<b>CO<sub>2</sub>-Einsparung im Ruhrgebiet durch Wasserstoffeinsatz</b>	311.596	467.394

Quelle: eigene Berechnung

Die übrigen Bereiche der chemischen Industrie stoßen prozessbedingte Luftemissionen zum größten Teil durch die Bereitstellung bzw. Umwandlung der Energie aus. So weisen im Ruhrgebiet die Hersteller von Basiskunststoffen und anorganischen Grundchemikalien an ihren Standorten eigene Kraftwerke auf, die neben Strom auch Prozesswärme produzieren. Dadurch sind die Reduktionspotenziale durch Wasserstoff eingeschränkt, da die Nutzung anderer erneuerbarer Energiequellen effizienter ist. Gleichwohl können auch in der chemischen Industrie im Bereich der Prozesswärme CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die Wasserstofftechnologie erreicht werden (siehe unten). Des Weiteren gibt es bei den Chemieunternehmen Ansätze, CO<sub>2</sub> stofflich zu nutzen, um so ebenfalls zum Klimaschutz beizutragen. So betreiben Evonik und Siemens Energy eine vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Versuchsanlage, die – unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien – Kohlendioxid und Wasser zur Herstellung von Chemikalien nutzt (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2020).

### Prozesswärme

Anders als in anderen Bereichen ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch Prozesswärme nicht direkt in den Daten des LANUV oder des UBA ausgewiesen. Anhaltspunkte liefert die AG Energiebilanzen, ein Verein von Verbänden und Forschungsinstituten. In den Anwendungsbilanzen wird nachgewiesen, für welche Zwecke Energie verwendet wird. Der Einzelbericht Industrie (Fraunhofer ISI, 2020) weist für Deutschland den Energieeinsatz für Prozesswärme nach Energieträgern nach. Zudem ist die Struktur des Energieträgereinsatzes für Nordrhein-Westfalen bekannt. Unter Abzug des Energieeinsatzes in der Branche Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen, deren Berücksichtigung eine Doppelzählung bedeuten würde, hat das Ruhrgebiet einen Prozesswärmebedarf von rund 25 TWh. Mithilfe der energieträgerspezifischen Emissionskoeffizienten ergibt sich daraus im Ruhrgebiet für das Jahr 2018 ein CO<sub>2</sub>-Ausstoß für Prozesswärme von 5.483.000 Tonnen (ohne Metallerzeugung).

In der Wasserstoffstudie NRW werden Annahmen für die einzelnen Szenarien getroffen, wie hoch der Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff in der Industrie ausfällt. Demnach werden zwischen 7 (2030 EL -55%) und 33 TWh Wasserstoff (2050 H<sub>2</sub>-95%) eingesetzt. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass der Wasserstoff ausschließlich zur Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt wird. Der Wasserstoff ersetzt dabei fossile Energieträger, wobei der aktuelle Technologiemarkt angelegt wird.

Die Einsparpotenziale zeigt Tabelle 5-4. Demnach werden in den Szenarien zwischen 338.515 (2030 EL -55%) und 1.595.855 (2050 H<sub>2</sub>-95%) Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart. Dies entspricht zwischen 6 und 29 Prozent des Ausgangswerts aus dem Jahr 2018.

**Tabelle 5-4: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale bei der Prozesswärme**Wasserstoffeinsatz in TWh und CO<sub>2</sub>-Reduktion in Tonnen

	Jahr/Szenario					
	2030 (-55%)		2050 (-80%)		2050 (-95%)	
	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>
<b>Wasserstoff als Brennstoff in der Industrie</b>	7	28	8	31	8	33
<b>CO<sub>2</sub>-Einsparung im Ruhrgebiet durch Wasserstoffeinsatz</b>	338.515	1.354.059	386.874	1.499.137	386.874	1.595.855

Quelle: eigene Berechnung

## 5.2 Verkehr

Im Verkehrssektor ist der Straßenverkehr der größte Emittent von CO<sub>2</sub>. Rund 91 Prozent des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes des Verkehrs gehen auf den Straßenverkehr zurück. Im Ruhrgebiet hat der Straßenverkehr damit im Jahr 2018 rund 8.260.000 Tonnen CO<sub>2</sub> verursacht. Damit bietet das Ruhrgebiet ein kompaktes Testfeld für die Anwendung von Elektromobilität und Brennstoffzellenantrieben zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>, zumal es bereits heute im Ruhrgebiet Ansatzpunkte für eine gute Infrastruktur bei Wasserstoff-tankstellen gibt.

Wasserstoff kann im Verkehr in brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen (FCEVs) und in Form von synthetisch aus H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> hergestelltem klimaneutralen Benzin bzw. Diesel zum Einsatz kommen. Im Folgenden werden die FCEVs betrachtet. Brennstoffzellenfahrzeuge sind, neben rein batteriebetriebenen Fahrzeugen, der einzige Fahrzeugtyp, der – bei Einsatz von grünem Wasserstoff – während des Betriebs kein CO<sub>2</sub> ausstößt. Wie verbreitet Brennstoffzellenfahrzeuge sein werden, ist schwierig abzuschätzen. Einige Studien gehen davon aus, dass Wasserstoff überwiegend dort im Verkehrsbereich zum Einsatz kommen wird, wo die direkte Nutzung von Strom schwierig, technisch nicht möglich oder nicht kosteneffizient ist (IN4climate.NRW, 2019). Derzeit zeigt der Trend eher in Richtung batteriebetriebene Fahrzeuge, weniger in Richtung Brennstoffzellenfahrzeuge. Szenarien gehen im Bereich der Personenkraftwagen für das Jahr 2040 von einem Brennstoffzellenfahrzeuganteil von lediglich rund 4 Prozent aus. Im Schwerlastverkehr werden Brennstoffzellen voraussichtlich in deutlich höherem Ausmaß zum Einsatz kommen, weil hier Batterien weitgehend ungeeignet erscheinen. Bis 2040 könnte der Anteil der mit Brennstoffzellen betriebenen Lkw bei bis zu 40 Prozent liegen (IW Consult, 2021).

Gleichwohl können technische Fortschritte und Kostendegressionen zu einer deutlich stärkeren Verbreitung von Pkw mit Brennstoffzellentechnologie führen. So wird in der Wasserstoffstudie NRW von Anteilen zwischen 5 und 80 Prozent ausgegangen, also optimistischen Annahmen zur Verbreitung der Wasserstofftechnologie im Verkehr (LBST, 2019). Zudem werden Annahmen dazu getroffen, welcher Teil des Verkehrs (nach Fahrzeugtypen) mit fossilen Brennstoffen, mit Batterien oder mit Brennstoffzellen betrieben wird.

Bei der Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale wird auf die Wasserstoffstudie NRW aufgesetzt. Diese weist aus, wie sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Verkehrs in den verschiedenen Szenarien entwickeln wird. Zusammen mit den Angaben zum Technologiemix, zur Fahrzeugstruktur im Ruhrgebiet (Daten des Kraftfahrt-Bundesamts) und ihrem spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstoß lässt sich so ermitteln, welchen Anteil

die Wasserstofftechnologie an der CO<sub>2</sub>-Einsparung im Ruhrgebiet hat. Das Reduktionspotenzial liegt demnach zwischen knapp 500.000 und 6.666.000 Tonnen und ist erheblich von den Annahmen zum Fahrzeuganteil mit Brennstoffzellenantrieb abhängig, der in den Szenarien zwischen 20 und 80 Prozent liegt.

**Tabelle 5-5: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale im Ruhrgebiet im Straßenverkehr**

CO<sub>2</sub> in Tonnen

	Jahr/Szenario					
	2030 (-55%)		2050 (-80%)		2050 (-95%)	
	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>
<b>CO<sub>2</sub>-Einsparung im Ruhrgebiet durch Wasserstoffeinsatz</b>	499.926	1.999.703	1.364.381	5.457.523	1.666.419	6.665.676

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von LANUV (2020a) und LBST (2019)

### 5.3 Wärme

Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Sektor Haushalte/Kleinverbraucher lag im Jahr 2018 im Ruhrgebiet – geschätzt nach Angaben des LANUV – bei circa 6.507.000 Tonnen, wobei der Großteil auf die Kleinf Feuerung zurückgeht. Wärme wird derzeit vor allem durch Verbrennung fossiler Energieträger erzeugt. Wasserstoff kann zukünftig ebenfalls zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. So hat die Wasserstoffstudie NRW in Szenarien die Rolle von Wasserstoff bei der Wärmeversorgung ermittelt (LBST, 2019). Zwei wichtige Annahmen sind dabei relevant:

- ▶ die Entwicklung des Wärmebedarfs und
- ▶ der Technologiemix zur Wärmeerzeugung mit spezifischen Emissionsfaktoren.

Auf die zukünftige Entwicklung des Wärmebedarfs hat vor allem die energetische Sanierung von Gebäuden Einfluss. Die Wasserstoffstudie NRW geht davon aus, dass durch die Gebäudeisolierung in Zukunft der Wärmebedarf bis zu gut 50 Prozent zurückgehen wird (LBST, 2019).

Der Wärmebedarf wird in einem Technologiemix aus Mineralöl, Erdgas, Strom, Fernwärme, Biomasse, Solarthermie sowie Wasserstoff(-Kessel) und Wasserstoff(-Brennstoffzelle) erzeugt. Dabei wird der Technologiemix aus den Szenarien der Wasserstoffstudie NRW zugrunde gelegt (Tabelle 5-6). Jede Technologie weist dabei einen bestimmten CO<sub>2</sub>-Emissionskoeffizienten je Wärmeeinheit auf (BAFA, 2019).

**Tabelle 5-6: TechnologiemiX zur Wärmeerzeugung**

Anteil an der gesamten Wärmeerzeugung in Prozent

	Jahr/Szenario					
	2030 (-55%)		2050 (-80%)		2050 (-95%)	
	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>
<b>Mineralöl</b>	12	12				
<b>Erdgas</b>	35	35	21	21		
<b>Strom</b>	17	4	22	6	31	8
<b>Fernwärme</b>	11	11	13	13	19	19
<b>Biomasse</b>	18	18	22	22	31	31
<b>Solarthermie</b>	4	4	16	16	11	11
<b>Wasserstoff</b>	4	17	6	23	7	31

Quelle: LBST (2019)

Zunächst wird für Deutschland das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial ermittelt. Für den zukünftigen Wärmebedarf wird im jeweiligen TechnologiemiX der CO<sub>2</sub>-Ausstoß ermittelt, der sich bei der Wärmeerzeugung mit und ohne Wasserstoff ergibt. Der Vergleich dieser beiden Größen zeigt das relative Einsparpotenzial der Wasserstofftechnologie. Anschließend werden die relativen Einsparpotenziale auf das Ruhrgebiet übertragen.

Für die Szenarien, wie sie in der Wasserstoffstudie NRW verwendet werden, ergeben sich für das Ruhrgebiet CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale zwischen 309.207 und 1.844.547 Tonnen. Die Einsparung durch Wasserstoff im Elektrifizierungsszenario 2050 (-95%) ist geringer als im Szenario 2050 (-80%), da der sinkende Wärmebedarf durch eine bessere Gebäudedämmung die zusätzliche Einsparung durch Wasserstoff übersteigt (Tabelle 5-7). Im Wasserstoffszenario steigt dagegen der Einsatz von Wasserstoff erheblich an, sodass es hier zu weiteren CO<sub>2</sub>-Einsparungen kommt.

**Tabelle 5-7: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale im Ruhrgebiet im Wärmebereich**CO<sub>2</sub> in Tonnen

	Jahr/Szenario					
	2030 (-55%)		2050 (-80%)		2050 (-95%)	
	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>	EL	H <sub>2</sub>
<b>CO<sub>2</sub>-Einsparung im Ruhrgebiet durch Wasserstoffeinsatz</b>	309.207	1.308.065	486.978	1.823.537	427.134	1.844.547

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von LANUV (2020a) und LBST (2019)

## 6 Einsparpotenziale im Ruhrgebiet heben

Politik und Gesellschaft verfolgen das ambitionierte Ziel, bis 2050 klimaneutral zu sein. Um dieses Ziel zu erreichen, ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoß erheblich zu verringern. Erforderlich ist bis zum Jahr 2050 eine Verringerung um 95 Prozent gegenüber dem Jahr 1990. Die Wasserstofftechnologie ist ein Teil der Lösung.

Dies gilt insbesondere für das Ruhrgebiet. Auf Grundlage des derzeitigen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes im Ruhrgebiet und bestehender überregionaler Szenarien zur Auswirkung der Wasserstofftechnologie auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß wurde berechnet, welchen Beitrag die Wasserstofftechnologie zur Verringerung des Treibhausgasausstoßes im Ruhrgebiet leisten kann.

Unabhängig davon, ob zukünftig eher auf die Elektrifizierungs- oder auf die Wasserstofftechnologie gesetzt wird, trägt Wasserstoff im Jahr 2050 in einem Szenario einer 95-prozentigen Reduktion der Treibhausgase im Ruhrgebiet in hohem Maße zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei (Tabelle 6-1): Die CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale liegen zwischen rund 19.530.000 und 25.500.000 Tonnen. Gegenüber dem heutigen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 35.540.000 Tonnen (ohne Energiewirtschaft) verringert die Wasserstofftechnik den CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 55 bis 72 Prozent. In der Industrie führt bei der Stahlerzeugung und den Raffinerien kein Weg an Wasserstoff vorbei, sollen CO<sub>2</sub>-Minderungsziele und Klimaneutralität erreicht werden. Dies zeigt das obige Ergebnis (Tabelle 5-2) für das 80-Prozent-Reduktionsziel, bei dem deutlich weniger auf Wasserstoff gesetzt wird.

**Tabelle 6-1: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale im Ruhrgebiet im Überblick**

In Tonnen; Szenarien mit Schwerpunkt auf Elektrifizierungs- oder Wasserstofftechnologie

		Ausgangspunkt	Szenario 2050 -95%	
		2018	Elektrifizierung	Wasserstoff
<b>Industrie</b>	<b>Stahl</b>	14.661.920	14.661.920	14.661.920
	<b>Raffinerien</b>	467.394	467.394	467.394
	<b>Prozesswärme</b>	5.482.992	386.874	1.595.855
	<b>Elektrizität</b> (Regelenergie; vom System abhängig; Einsparung gegenüber Erdgaskraftwerken im jeweiligen Szenario 100 %)	-	1.921.730	262.054
<b>Wärme</b> (Ausgangspunkt: geringerer Wärmebedarf im Jahr 2050 aufgrund der Gebäudeisolierung)		3.596.916 (Jahr 2050)	427.134	1.844.547
<b>Straßenverkehr</b>		8.263.478	1.666.419	6.665.676
<b>Zusammen</b>			<b>19.531.471</b>	<b>25.497.447</b>

Quelle: eigene Berechnung

Die CO<sub>2</sub>-Einsparungen fallen im WasserstoffszENARIO höher aus als im Elektrifizierungsszenario, da stärker auf die Wasserstofftechnologie gesetzt wird. Welches Szenario zukünftig eintreten wird, hängt – neben dem technologischen Fortschritt – auch von der Förderung der einzelnen Pfade ab. Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Pfade mit unterschiedlichen Vermeidungskosten verbunden sind.

In der Wasserstoffstudie NRW sind für Deutschland die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten im Energiesystem ermittelt worden. Mittelfristig (bis zum Jahr 2030) ist ein Energiesystem mit Fokus auf die Elektrifizierung günstiger, langfristig (bis zum Jahr 2050) steigen die Verteilungskosten im Elektrifizierungsszenario stark an, weshalb das WasserstoffszENARIO langfristig günstiger ist. Die Vermeidungskosten liegen im Elektrifizierungsszenario bei 284 Euro je Tonne CO<sub>2</sub>, im WasserstoffszENARIO betragen sie 248 Euro je Tonne CO<sub>2</sub>. Bei der Ermittlung der Vermeidungskosten werden die jährlichen Gesamtkosten des Energiesystems (erforderliche Investitionsausgaben, variable und flexible Kosten für die Energieerzeugung, Transport und Systemflexibilisierung) ins Verhältnis zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung gesetzt (LBST, 2019).

Aus Sicht der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung liegt eine Herausforderung beim Markthochlauf der Wasserstofftechnologie in den derzeit noch höheren Kosten, die mit grünem Wasserstoff verbunden sind. Der Kostenunterschied soll durch den Markthochlauf über Lernkurven und Skaleneffekte verringert bzw. aufgelöst werden. Aus ökonomischen Gründen soll der Markthochlauf gezielt und schrittweise erfolgen. Priorität haben demnach die Nutzung von Wasserstoff als alternativem Kraftstoff in bestimmten Bereichen des Verkehrs sowie als Grundstoff für die stoffliche Verwertung und der Einsatz als Reduktionsmittel in der Industrie (Deutscher Bundestag, 2020), wobei die Stahl- und Chemieindustrie eine zentrale Rolle spielen. Wichtige Voraussetzung für den Einsatz von Wasserstoff in der Stahl- und Chemieindustrie ist die Anpassung der beihilferechtlichen Rahmenbedingungen in der Europäischen Union, da diese derzeit die staatliche Unterstützung von größeren Unternehmen untersagen (Deutscher Bundestag, 2020). Gleichwohl stehen bereits erste Förderprogramme wie der Fonds zur „Dekarbonisierung in der Industrie“ sowie die Programme zum „Wasserstoffeinsatz in der Industrieproduktion“ (2020 bis 2024) und zur „CO<sub>2</sub>-Vermeidung und -Nutzung in Grundstoffindustrien“ bereit. Zudem wird überlegt, in Deutschland oder Europa eine Nachfragequote für klimafreundliche Grundstoffe, wie „grünen Stahl“, einzuführen. Auch sind branchenspezifische

Dialogformate angedacht, um gemeinsam mit Stakeholdern insbesondere der energieintensiven Industrie langfristige Dekarbonisierungsstrategien auf Basis von Wasserstoff zu entwickeln. Gestartet wird in der Chemie-, Stahl-, Logistik- und Luftfahrtbranche, weitere Branchen sollen folgen (Deutscher Bundestag, 2020).

NRW könnte dabei eine Vorreiterrolle einnehmen, da es ein Verbrauchsschwerpunkt von Wasserstoff ist und bereits zahlreiche Projekte mit Schwerpunkt auf Wasserstoffnutzung, -erzeugung und -transport in der Umsetzung oder geplant sind (IN4climate.NRW, 2019). Angesichts der Wasserstoff-Roadmap des Landes NRW ist bereits in dieser Dekade mit den ersten CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die Wasserstofftechnologie zu rechnen. Innerhalb Nordrhein-Westfalens ist es das Ruhrgebiet, das eine Region par excellence für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologie ist.

## 7 Literatur

ArcelorMittal (2019a), ArcelorMittal publishes first Climate Action Report; Pressemitteilung vom 29.5.2019; URL: <https://corporate.arcelormittal.com/media/press-releases/arcelormittal-publishes-first-climate-action-report>

ArcelorMittal (2019b), Beitrag zum Green Deal: ArcelorMittal Europe will CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 um 30 Prozent senken; Pressemitteilung von 17.12.2019; URL: [https://germany.arcelormittal.com/News-und-Medien/2019/broker.jsp?uMen=89b7978c-4ffe-7610-3928-d05b8e0b2b66&uCon=d7870589-4591-1f61-f380-d1915d02337a&uTem=aaaaaaaa-aaaa-aaaa-aaaa-000000000042&ic\\_current-page=1&ic\\_currentpagesize=60&all=true&ic\\_back=true](https://germany.arcelormittal.com/News-und-Medien/2019/broker.jsp?uMen=89b7978c-4ffe-7610-3928-d05b8e0b2b66&uCon=d7870589-4591-1f61-f380-d1915d02337a&uTem=aaaaaaaa-aaaa-aaaa-aaaa-000000000042&ic_current-page=1&ic_currentpagesize=60&all=true&ic_back=true)

BAFA (2019), Merkblatt zu den CO<sub>2</sub>-Faktoren – Energieeffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss und Kredit, Version 1.1 vom 1.1.2019

Bundesanstalt für Straßenwesen (2017), SVZ 2015 Datensatz; URL: [https://www.bast.de/BASt\\_2017/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/SVZ-2015-Daten.html](https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/SVZ-2015-Daten.html)

Bundesanstalt für Straßenwesen (2020), DTV durchschnittlicher täglicher Verkehr, automatische Zählstellen; URL: [https://www.bast.de/BASt\\_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl\\_aktuell\\_node.html?nn=1819516&cms\\_filter=true&cms\\_land=5&cms\\_map=0](https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl_aktuell_node.html?nn=1819516&cms_filter=true&cms_land=5&cms_map=0)

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2020), Für eine klimafreundliche Industrie: Kohlendioxid und Wasserstoff als Rohstoffe für nachhaltige Chemikalien nutzen – Pressemitteilung vom 21.9.2020; URL: <https://www.bmbf.de/de/fuer-eine-klimafreundliche-industrie-kohlendioxid-und-wasserstoff-als-rohstoffe-fuer-12543.html>

Bundesnetzagentur (2020), Regulierung von Wasserstoffnetzen – Eine Bestandsaufnahme der Bundesnetzagentur; URL: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/Wasserstoff/Wasserstoffpapier.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/Wasserstoff/Wasserstoffpapier.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

Bundesumweltministerium (2020a), Kyoto-Protokoll – Verpflichtungsperioden; URL: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/kyoto-protokoll/verpflichtungsperioden/>

Bundesumweltministerium (2020b), Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie; URL: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>

Bundesumweltministerium (2020c), Sektorziele und Jahresemissionsmengen; URL: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Bilder\\_Sharepics/mehrklimaschutz/sectorziele\\_emissionen.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Bilder_Sharepics/mehrklimaschutz/sectorziele_emissionen.pdf)

Bundesumweltministerium (2020d), Themen: Grüner Wasserstoff & nachhaltige strombasierte Brenn-, Kraft- und Grundstoffe (Power-to-X); URL: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/wasserstoff-und-power-to-x/gruener-wasserstoff-und-ptx/>

Bundesverband der Deutschen Industrie (2018), Klimapfade für Deutschland. Boston Consulting Group und Prognos im Auftrag des BDI

Deutsche Energie-Agentur (dena) (2018), Leitstudie integrierte Energiewende – Teil B: Gutachterbericht von ewi Energy Research & Scenarios gGmbH im Auftrag der dena

Deutsche Energie-Agentur (dena)/EWI (2018), dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050; URL: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_lang.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf)

Deutscher Bundestag (2020), Unterrichtung durch die Bundesregierung: Nationale Wasserstoffstrategie, Drucksache 19/20363

Europäische Union (2006), Verordnung (EG) Nr. 166/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18.1.2006 über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzung- und -verbringungsregisters und zur Änderung der Richtlinien 91/689/EWG und 96/61/EG des Rates, Anhang II; Amtsblatt der Europäischen Union, L33/1 vom 4.2.2006

FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2017), Kurzstudie Power-to-X: Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB

FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2019), Studie zur Regionalisierung von PtG-Leistungen für den Szenariorahmen NEP Gas 2020 bis 2030

Fraunhofer ISE (2019), Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland

Fraunhofer ISI (2020), Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD; Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) – Entwurf

H2.LIVE (2020), H2 tanken – Wasserstoffmobilität beginnt jetzt; URL: <https://h2.live/>

IN4climate.NRW (2019), Wasserstoff als Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende: den Einstieg jetzt ermöglichen. Ein Diskussionsbeitrag der AG Wasserstoff von IN4climate.NRW zur Entwicklung der nationalen Wasserstoffstrategie

IW Consult GmbH (2021), Zukunft der Automobilwirtschaft in Nordrhein-Westfalen. Eine Untersuchung im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, URL: [https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/210226\\_endbericht\\_automobilwirtschaft\\_nrw\\_final.pdf](https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/210226_endbericht_automobilwirtschaft_nrw_final.pdf)

IW Consult GmbH (2020), Wasserstoffranking 2020: Wo steht das Ruhrgebiet im Metropolenvergleich? Studie für den Regionalverband Ruhr; URL: <https://www.iwconsult.de/aktuelles/projekte/wasserstoff-ranking-2020>

Institut der deutschen Wirtschaft/frontier economics (2018), Synthetische Energieträger – Perspektiven für die deutsche Wirtschaft und den internationalen Handel. Eine Untersuchung der Marktpotenziale, Investitions- und Beschäftigungseffekte. Studie im Auftrag von IWO, MEW und UNITI

International Energy Agency (2017a), World Energy Outlook 2017; URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>

International Energy Agency (2017b), Energy Technology Perspectives 2017 – Catalysing Energy Technology Transformations; URL: [https://webstore.iea.org/download/direct/1058?fileName=Energy\\_Technology\\_Perspectives\\_2017.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/1058?fileName=Energy_Technology_Perspectives_2017.pdf)

Kraftfahrt-Bundeamt (2020), Der Fahrzeugbestand am 1.1.2020; URL: [https://www.kba.de/Shared-Docs/Pressemitteilungen/DE/2020/pm\\_06\\_19\\_bestand\\_01\\_20\\_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=3](https://www.kba.de/Shared-Docs/Pressemitteilungen/DE/2020/pm_06_19_bestand_01_20_pdf.pdf?blob=publicationFile&v=3)

Länderarbeitskreis Energiebilanzen (2020), CO<sub>2</sub>-Bilanzen; URL: <https://www.lak-energiebilanzen.de/co2-bilanzen/>

LANUV (2020a), Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Treibhausgas-Emissionsinventar – Nordrhein-Westfalen 2018, LANUV-Fachbericht 105

LANUV (2020b), Online-Emissionskataster Luft NRW; URL: <http://www.ekl.nrw.de/ekat/>

LBST (2019), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik – Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Eine Expertise für das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020a), Klimaschutzgesetz NRW; URL: <https://www.klimaschutz.nrw.de/instrumente/klimaschutzgesetz>

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020c), Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen; <https://www.wirtschaft.nrw/pressemitteilung/wasserstoff-roadmap-fuer-nordrhein-westfalen-vorgestellt>

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020b), Stahl und Metalle; URL: <https://www.wirtschaft.nrw/stahl-und-metalle>

Salzgitter AG (2019), Salzgitter AG und Tenova unterzeichnen Absichtserklärung für das SALCOS-Projekt: CO<sub>2</sub>-arme Stahlproduktion auf Wasserstoffbasis; Pressemitteilung vom 3.4.2019; URL: <https://www.salzgitter-flachstahl.de/de/news/pressemeldung-der-salzgitter-ag/2019-04-03/salzgitter-ag-und-tenova-unterzeichnen-absichtserklrung-fr-das-salcosprojekt-co2arme-stahlproduktion-auf-wasserstoffbasis.html>

thyssenkrupp (2019), thyssenkrupp gibt sich klare Ziele: Konzern will bis 2050 klimaneutral sein – für 2030 bereits 30 Prozent weniger Emissionen geplant; Pressemitteilung vom 2.7.2019; URL: <https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/thyssenkrupp-gibt-sich-klare-ziele>

-konzern-will-bis-2050-klimaneutral-sein---fuer-2030-bereits-30-prozent-weniger-emissionen-geplant-12803.html

Umweltbundesamt (2019a), Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990 bis 2017 unter Verwendung von Berechnungsergebnissen der Nationalen Koordinierungsstelle Emissionsberichterstattung; CLIMATE CHANGE 26/2019

Umweltbundesamt (2019b), Rescue-Studie – Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, Climate Change 36/2019

Umweltbundesamt (2020a), Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 bis 2018 – Stand EU-Submission: 15.1.2020

Umweltbundesamt (2020b), Kleinfeuerungsanlagen; URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebranchen/feuerungsanlagen/kleinfeuerungsanlagen#anlagenbestand-in-deutschland>

Umweltbundesamt (2020c), PRTR-Gesamtdatenbestand; URL: <https://www.thru.de/thrude/downloads/>

Umweltbundesamt (2020d), CO<sub>2</sub>-Rechner des Umweltbundesamtes; [https://uba.co2-rechner.de/de\\_DE/](https://uba.co2-rechner.de/de_DE/)

VGR der Länder (2020), Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den Ländern der Bundesrepublik Deutschland 1991 bis 2019, Reihe 1, Länderergebnisse Band 1

VGR der Länder (2019), Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den kreisfreien Städten und Landkreisen der Bundesrepublik Deutschland 1992 und 1994 bis 2017, Reihe 2, Kreisergebnisse Band 1

Wetzel (2020), Unter der Erde schlummert der weiße Schatz, Die Welt 24.10.2020

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2019), Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2019, [https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2019/09/WVStahl\\_Fakten\\_zur\\_Stahlindustrie\\_2019.pdf](https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2019/09/WVStahl_Fakten_zur_Stahlindustrie_2019.pdf)

Wismann et al. (2019), Electrified methane reforming: A compact approach to greener industrial hydrogen production; in: Science 364, 756–759 (2019)

