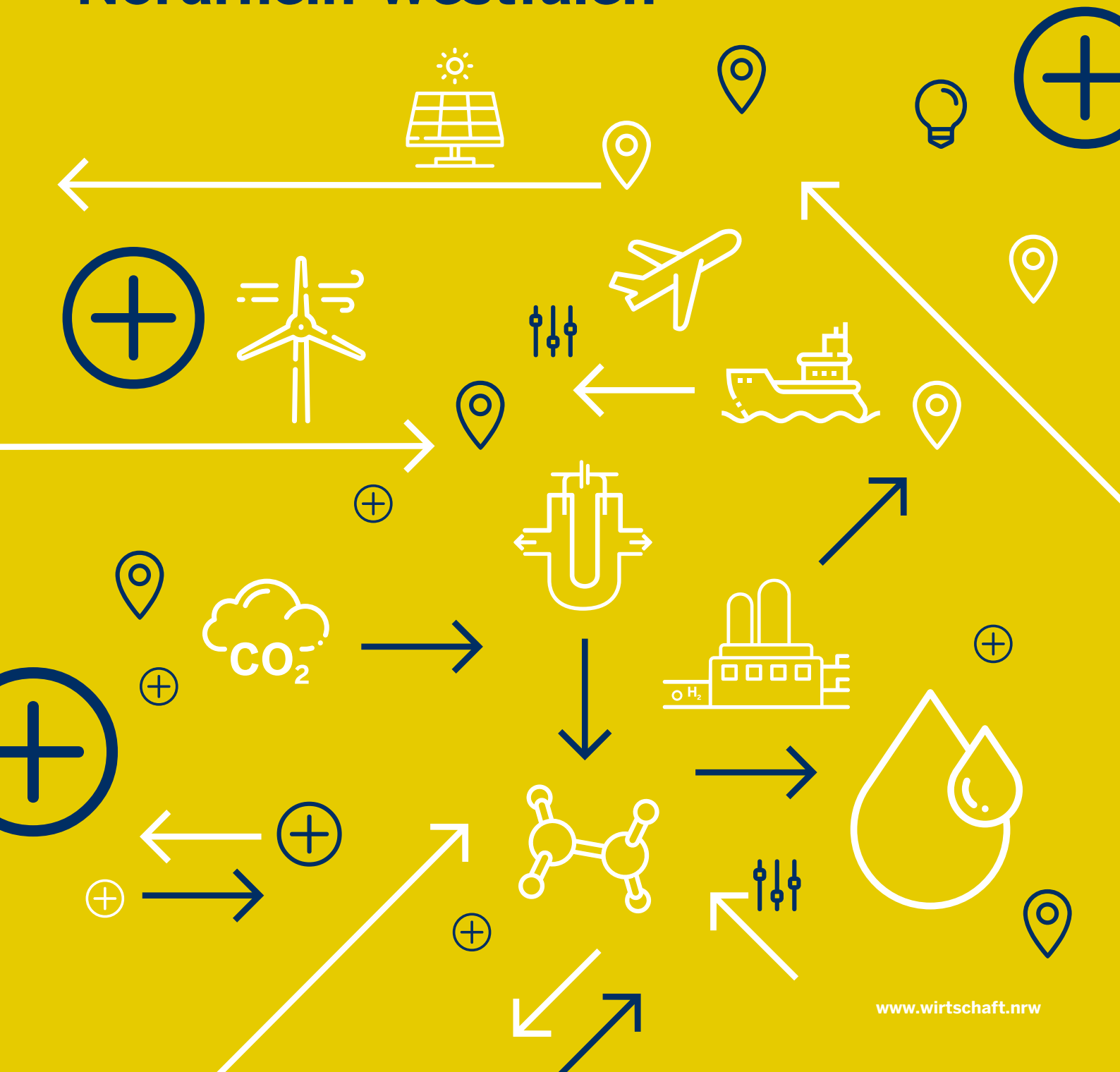




# Handlungskonzept Synthetische Kraftstoffe Nordrhein-Westfalen

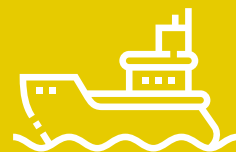




„Wir stehen am Beginn einer umfassenden Transformation, deren Erfolg vor allem von innovativen, forschungs- und technologiegetriebenen Lösungen abhängt.“

**Prof. Dr. Andreas Pinkwart**

Minister für Wirtschaft, Innovation,  
Digitalisierung und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen



## Handlungskonzept Synthetische Kraftstoffe Nordrhein-Westfalen



Liebe Leserinnen und Leser,

der Pfad Richtung Klimaneutralität, den es mit enormen Anstrengungen bis zum Jahr 2045 zu beschreiten gilt, erfordert einen tiefgreifenden Wandel in allen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bereichen. Wir stehen am Beginn einer umfassenden Transformation, deren Erfolg vor allem von innovativen, forschungs- und technologiegetriebenen Lösungen abhängt. Auch der Mobilitätssektor muss hierzu seinen Beitrag erbringen und mit neuen Konzepten und innovativen Technologien klimafreundlich werden.

Um Mobilität in all ihren Facetten – vom Reisen bis zum internationalen Warenverkehr – in einer klimaneutralen Zukunft zu sichern, benötigen wir einen Ersatz für fossile Kraftstoffe. Neben der Elektromobilität und dem Einsatz von Wasserstoff sind synthetische Kraftstoffe hierfür ein entscheidendes Element. Sie ermöglichen nicht nur klimaneutrale Mobilität, etwa im Luftverkehr, sondern sind auch ein wesentlicher Enabler für eine klimaneutrale Industrie in Nordrhein-Westfalen. Um die Produktion und den Einsatz der synthetischen Kraftstoffe voranzutreiben, benötigen wir große Demonstrationsanlagen hier vor Ort und gleichzeitig, um den hohen Bedarf zu decken, internationale Kooperationen für den Import. Für die Unternehmen und für unser Land liegen darin große Chancen: Wir wollen die Potenziale für in Nordrhein-Westfalen entwickelte Anlagen und Ideen in einem wachsenden globalen Markt für Klimaschutztechnologien heben. So machen wir Nordrhein-Westfalen zum Modellstandort für die Wertschöpfungsketten der Zukunft.

Mit dem vorliegenden Handlungskonzept verdeutlichen wir, welche Rolle synthetische Kraftstoffe für den Pfad Richtung Klimaneutralität bis 2045 haben können, und zeigen gleichzeitig die sich daraus entwickelnden Chancen für unseren Raffinerie- und Industriestandort auf. Mit unserem Aktionsplan bringen wir diese Ideen in die Umsetzung und laden Sie herzlich ein, gemeinsam an einer klimaneutralen Zukunft zu arbeiten.

In diesem Sinne wünsche ich eine informative wie inspirierende Lektüre.

**Prof. Dr. Andreas Pinkwart**

Minister für Wirtschaft, Innovation,  
Digitalisierung und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen



# Inhalt

06–09  
**Executive Summary**

**01** 10–11  
**Synthetische Kraftstoffe – ein wichtiger Baustein der klimaneutralen Transformation**

**02** 12–15  
**Der politische Rahmen**

13  
→ **2.1** Europäische Union

14  
→ **2.2** Bundesebene – die Power to Liquid (PtL) Roadmap

15  
→ **2.3** Nordrhein-Westfalen

**03** 16–31  
**Synthetische Kraftstoffe: Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsfelder**

19–22  
→ **3.1** Wie werden synthetische Kraftstoffe hergestellt?

23–24  
→ **3.2** Einsatzfelder synthetischer Kraftstoffe

25–31  
→ **3.3** Wann sind synthetische Kraftstoffe klimaneutral?

**04** 32–39  
**Forschung und Entwicklung**

33–35  
→ **4.1** Übersicht der Universitäten und Hochschulen in NRW

36–37  
→ **4.2** Allianz von Wissenschaft und Industrie made in NRW – Verbundprojekte

38–39  
→ **4.3** Forschung und Industrie – internationale Partnerschaften

**05** 40–59  
**Synthetische Kraftstoffe – neue Wertschöpfungsketten**

41–46  
→ **5.1** Nordrhein-Westfalen als Produktionsstandort synthetischer Kraftstoffe

47–59  
→ **5.2** Internationale Märkte

**06** 60–65  
**Aktionsplan**

66 **Quellenverzeichnis**  
67 **Impressum**

06-09

## Executive Summary



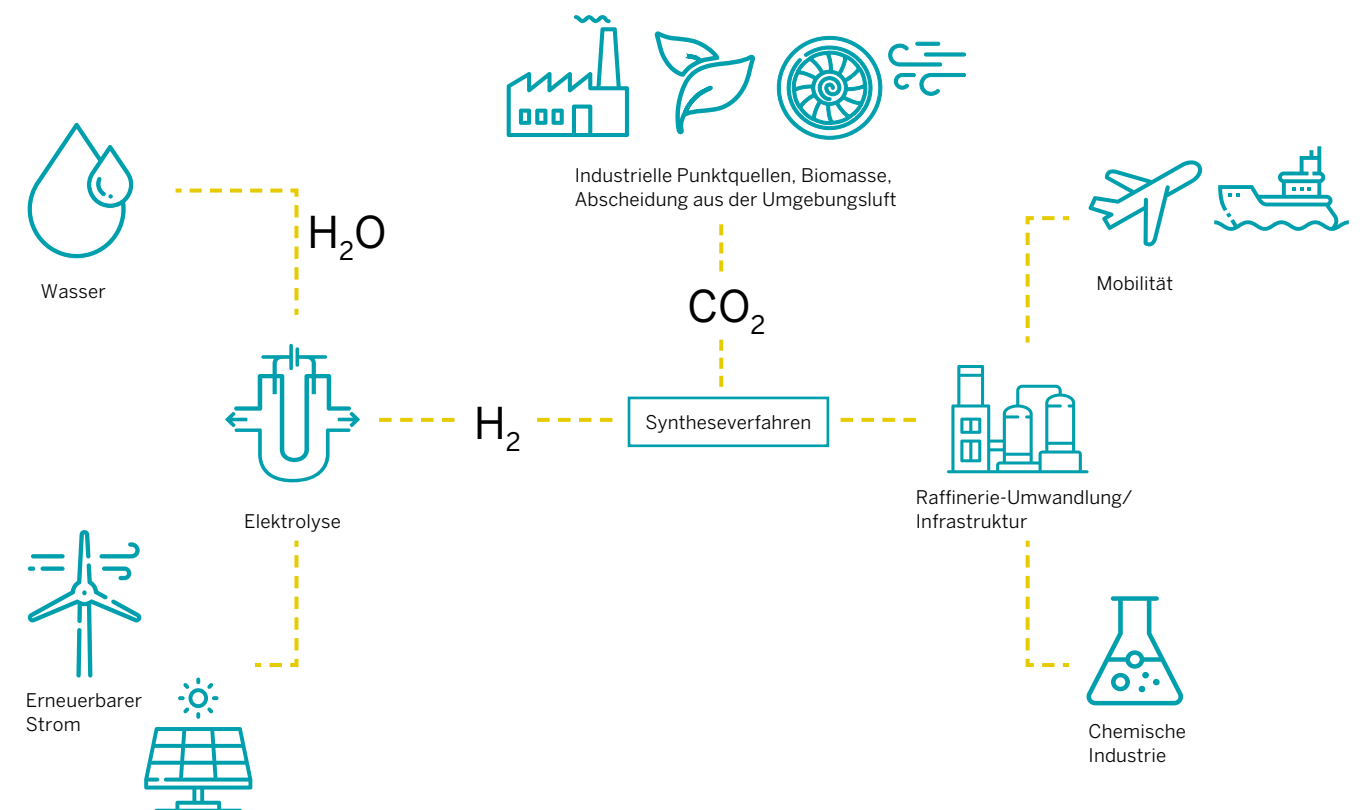
Synthetische Kraftstoffe werden im Energiemix der Zukunft und für die Erreichung der Klimaschutzziele eine wesentliche Rolle spielen.



Mit dem Handlungskonzept zeigt das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE) auf, wo ihr Einsatz sinnvoll ist und wie Nordrhein-Westfalen die sich bietenden ökonomischen und ökologischen Chancen nutzen kann. Mit dem Handlungskonzept stellt das MWIDE einen Aktionsplan, der aufzeigt, wie die Produktion und der Einsatz

synthetischer Kraftstoffe gezielt gefördert werden können. Mit erneuerbarem Strom, Wasser und Kohlenstoffdioxid können klimafreundliche Kraftstoffe wie synthetisches Kerosin oder Diesel hergestellt werden. Sie gleichen in ihren Eigenschaften den fossilen Kraftstoffen und können deshalb in bestehenden Motoren eingesetzt werden.

Abbildung 1: Produktionsprozess synthetischer Kraftstoffe (vereinfacht)

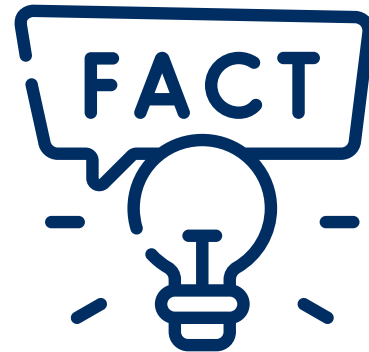




## Die Kernaussagen des Handlungskonzepts sind:

# 1

Synthetische Kraftstoffe sind ein wichtiger **Baustein zur Erreichung der Klimaschutzziele** in Nordrhein-Westfalen.



# 6

Synthetische Kraftstoffe sollen **klimaneutral produziert** werden, um einen maximalen Beitrag zum Klimaschutz leisten zu können. Das bedeutet langfristig, dass die Produktion auf **grünem Wasserstoff** basiert und das **benötigte CO<sub>2</sub> aus biogenen Quellen oder durch Abscheidung aus der Umgebungsluft** gewonnen wird und einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf bildet. Auch der Anlagenbetrieb und der Transport müssen klimaneutral erfolgen. **Um den Markthochlauf anzustoßen, ist aber eine Übergangsphase notwendig**, in der auch blauer Wasserstoff und CO<sub>2</sub> aus industriellen Prozessen eingesetzt wird.

# 2

Synthetische Kraftstoffe sollten insbesondere in den Bereichen eingesetzt werden, in denen eine Elektrifizierung nicht oder nur sehr schwer möglich ist. Dazu zählen der (Langstrecken-)**Flugverkehr**, die (Hochsee-)**Schifffahrt** und die Nutzung in der **chemischen Industrie** als Grundstoff.

# 3

Der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen wird in Nordrhein-Westfalen voraussichtlich bei **139 TWh pro Jahr in 2050** liegen. Davon werden aktuellen Prognosen zufolge 129 TWh pro Jahr nach Nordrhein-Westfalen importiert und 10 TWh vor Ort hergestellt werden.<sup>1</sup>

# 7

Synthetische Kraftstoffe werden ein **global gehandeltes Produkt** sein. Der größte Kostenfaktor bei der Herstellung synthetischer Kraftstoffe sind die Stromgestehungskosten. Synthetische Kraftstoffe werden deshalb voraussichtlich überwiegend in Regionen mit großen Potenzialen für erneuerbare Stromerzeugung hergestellt werden. **Um die Bedarfe in Nordrhein-Westfalen sicherstellen zu können, müssen rechtzeitig internationale Partnerschaften aufgebaut werden.**

# 8

Die globale Nachfrage nach Klimaschutztechnologien bietet einen **Absatzmarkt für in NRW entwickelte Anlagen, Komponenten und Ideen.**

# 4

Vor allem im Luftverkehr wird es auch noch **langfristig Bedarf an flüssigen Kraftstoffen mit einer hohen Energiedichte** geben, genauso wie in der chemischen Industrie an Grundstoffen. Diese Nachfrage muss durch klimafreundliche Produkte – wie synthetische Kraftstoffe – gedeckt werden.

# 5

Die Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen steigt signifikant voraussichtlich erst ab 2030. Die langen Investitionszyklen erfordern jedoch, dass bereits **jetzt in den Aufbau von Produktionsanlagen und Infrastruktur investiert** wird.

# 9

Synthetische Kraftstoffe bieten **wichtige industriepolitische Chancen für Nordrhein-Westfalen**. Sie werden Teil der **Transformationsprozesse der Raffinerien und chemischen Industrie** in Nordrhein-Westfalen und erschließen diesen neue Geschäftsmodelle.

# 10

Cross-industrielle Kooperationen sind der Schlüssel für den sektorübergreifenden **Transformationsprozess in Richtung Klimaneutralität 2045**. **Nordrhein-Westfalen wird Modellstandort für innovative Power-to-X-Wertschöpfungsketten.**

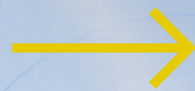
01

10–11

## Synthetische Kraftstoffe – ein wichtiger Baustein der klimaneutralen Transformation



Das Jahr 2021 bedeutet für den Klimaschutz vor allem eins: schärfere Zielsetzungen.



Deutschland hat nach dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts im Juni seine Klimaschutzziele deutlich nach oben korrigiert: für das Jahr 2030 minus 65 Prozent statt minus 55 Prozent im Vergleich zum Basisjahr 1990. Für das Jahr 2040 wurde ein Zwischenziel von minus 88 Prozent ergänzt. Im Jahr 2045 soll schließlich Treibhausgasneutralität erreicht sein – und damit fünf Jahre früher als bislang geplant. Als erstes Bundesland hat Nordrhein-Westfalen die Bundesziele im Juli 2021 in die Neufassung des Klimaschutzgesetzes Nordrhein-Westfalen übernommen. Auch die Klimaschutzziele auf europäischer Ebene wurden angezogen und mit „Fit for 55“ hat die EU-Kommission ein umfangreiches Gesetzespaket vorgelegt, welches den Regulierungsrahmen der europäischen Energie- und Klimapolitik an das europäische Klimaschutzziel anpassen soll. Bis zum Jahr 2030 sollen die Treibhausgasemissionen der EU um 55 Prozent – statt bisher 40 Prozent – reduziert werden. Ambitionierte Klimaschutzziele allein reichen aber nicht aus. Mindestens genauso wichtig ist ihre effektive Umsetzung. Es muss jede Möglichkeit genutzt werden, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten Jahrzehnten kontinuierlich weiter zu senken. Nordrhein-Westfalen ist hier mit einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 45 Prozent bis 2020 im Vergleich zum Jahr 1990 schon auf einem guten Kurs. Um das nächste Ziel – minus 65 Prozent bis 2030 – zu schaffen, gilt es, heute die Grundlagen für die Transformation des Energiesystems zu legen und konkrete Handlungspläne zu entwerfen – wie es die Landesregierung bereits 2020 mit der Wasserstoff-Roadmap zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft vorgemacht hat. Die gleiche Stoßrichtung verfolgt nun das Handlungskonzept synthetische Kraftstoffe: Es bietet einen konkreten Aktionsplan, der aufzeigt, wie synthetische Kraftstoffe eine sinnvolle Ergänzung bei den Klimaschutzbemühungen der Landesregierung sein können.

**Klar ist: Synthetische Kraftstoffe sind für die Erreichung der Klimaschutzziele ein wesentlicher Baustein.** Der achte Monitoring-Bericht zur Energiewende zeigt erneut eine Tendenz auf, die bereits in den vorherigen Jahren klar erkennbar war: Der Verkehrssektor entwickelt sich gegenläufig zu den Zielen des deutschen Energiekonzepts bzw. der Klimaschutzziele. Während beispielsweise die Ziele im Stromsektor voraussichtlich erreicht werden, müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor noch erheblich gesenkt werden. Betrug der Treibhausgasausstoß 1990 in Deutschland 164 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>, waren es 2020 immer noch 146 Mio. Bis 2030 gilt es, das Tempo bei der Reduktion der Emissionen im Verkehrssektor erheblich zu steigern. Denn 2030 sollen auf diesen Sektor planmäßig nur noch 85 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> entfallen. **Grundsätzlich gilt: Die Energiewende und das Erreichen der Klimaschutzziele werden nur gelingen, wenn die Reduktionsziele in allen Sektoren gleichermaßen erreicht werden.**

Im derzeit noch hinterherhinkenden Verkehrssektor müssen deshalb jetzt weitere Weichen gestellt werden, um auch Klimaneutralität bis 2045 herstellen zu können.

Neben der weiterhin notwendigen Erhöhung der Verkehrseffizienz und der Entwicklung neuer Mobilitätskonzepte bieten sich hierfür auch alternative Kraftstoffe und Antriebe an. Im Fokus steht bisher die Elektromobilität. Es bleiben allerdings auch Anwendungsfälle, bei denen eine direkte Elektrifizierung nicht oder nur sehr schwer umsetzbar ist und auch direkt auf Wasserstoff basierende Antriebe keine Option sind. Strombasierte, synthetische Kraftstoffe sind daher ein möglicher Weg, um eine klimagerechte Mobilität auch im Flug- und Schiffsverkehr zu gewährleisten. Neben dem Verkehrssektor können synthetische Kraftstoffe – bzw. die Zwischenprodukte – auch als Ausgangsstoff in der Industrie eingesetzt werden und so einen wichtigen Beitrag zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der industriellen Produktion leisten.

Die Wasserstoff-Roadmap NRW aus dem Jahr 2020 hat gezeigt, wie viel Potenzial in Power-to-X-Technologien (PtX-Technologien) gerade für das Industrieland Nordrhein-Westfalen steckt. Dieses Handlungskonzept knüpft nahtlos daran an und nimmt strombasierte, synthetische Kraftstoffe – und damit ein Wasserstoff-Folgeprodukt – in den Blick. **Die Stärken Nordrhein-Westfalens als Innovations- und Raffineriestandort mit einer hohen Dichte an hervorragenden Universitäten, Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie einer Vielzahl an innovativen Industrieunternehmen ist für unser Bundesland die Chance, die Technologieentwicklung und Produktion von synthetischen Kraftstoffen gezielt in Nordrhein-Westfalen zu etablieren und unseren Industriestandort somit zu stärken.** Ein starkes Profil bei Klimaschutztechnologien festigt nicht nur Arbeitsplätze in der Industrie und macht sie zukunftsfit. Sie bietet darüber hinaus Chancen für die gesamte Zulieferer- und Komponentenindustrie in Nordrhein-Westfalen. Gerade die vielschrittige Wertschöpfungskette synthetischer Kraftstoffe ermöglicht eine nachhaltige Stärkung der Wirtschaft und Arbeitsplätze. Nordrhein-Westfalen kann seine Stärke im Maschinen- und Anlagenbau dafür nutzen, innovative Technologien wettbewerbsfähig auf dem Exportmarkt zu platzieren. Allerdings stehen den vielen Vorteilen synthetischer Kraftstoffe derzeit auch noch einige Herausforderungen gegenüber: die mangelnde Effizienz ihrer Herstellung und ihre fehlende Wirtschaftlichkeit. **Mit dem Handlungskonzept wollen wir deshalb vor allem den Markthochlauf anreizen und gezielt Optimierungspotenziale heben.**



## 02

12–15

## Der politische Rahmen



Der erfolgreiche Markthochlauf synthetischer Kraftstoffe kann nur gelingen, wenn der politische Rahmen stimmt und ehrgeizige Ziele vorgibt.

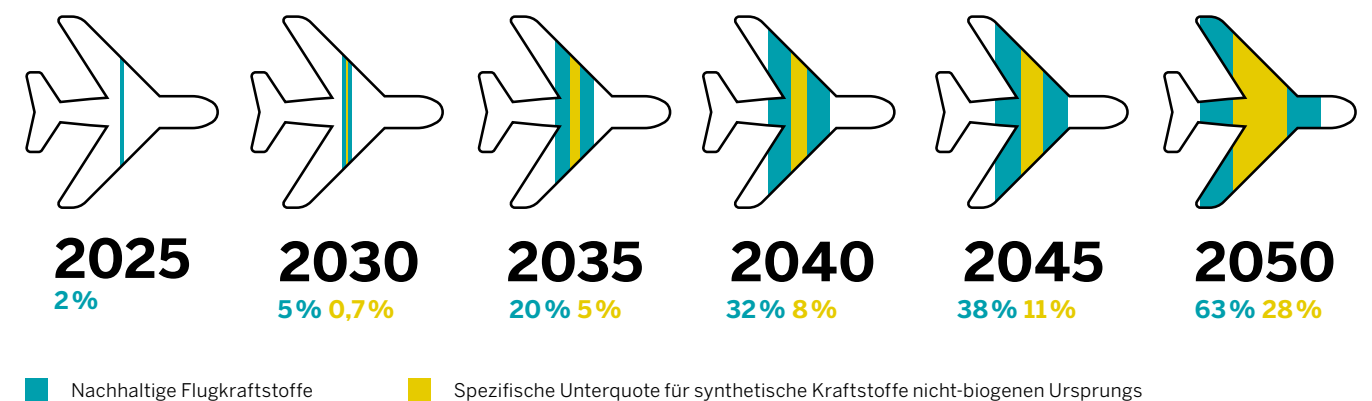


## 2.1 Europäische Union

Im Rahmen der ehrgeizigen Zielsetzungen des Europäischen Grünen Deals sieht die Europäische Kommission vor, die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 90 Prozent zu verringern. Im Zuge des am 14.07.2021 vorgestellten Legislativpakets „Fit for 55“ wird in diesem Sinne nicht zuletzt auch die Förderung synthetischer Kraftstoffe als wichtige Maßnahme zur Emissionseinsparung im Verkehrsbereich gesehen. So werden konkret im Rahmen der überarbeiteten Erneuerbare-Energien-Richtlinie (2018/2001) eine Anhebung der energiebasierten Zielvorgaben für fortschrittliche Biokraftstoffe sowie Biogas und die Einführung einer Zielvorgabe für erneuerbare Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs vorgeschlagen.

Im Rahmen der Initiative „ReFuelEU Aviation“ will die Europäische Kommission insbesondere auch die Nutzung von nachhaltigen alternativen Flugkraftstoffen (Sustainable Aviation Fuels – SAF) stärken, indem sie Beimischungsquoten festlegt. Kraftstofflieferanten sollen verpflichtet werden, alle fünf Jahre die Beimischung von nachhaltigen Kraftstoffen zu steigern: 2 Prozent sollen es zunächst bis 2025 sein, 63 Prozent dann im Jahr 2050. Hinzu kommt eine Quote für synthetische Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs, angefangen von 0,7 Prozent ab 2030 bis hin zu 28 Prozent bis 2050. Flughäfen mit mehr als 1 Mio. Passagiere im Jahr sollen verpflichtet werden, die Infrastruktur für die Lieferung, Lagerung und Betankung von alternativen Kraftstoffen zur Verfügung zu stellen.

Abbildung 2: Ziele für Sustainable Aviation Fuels (SAF) der Initiative „ReFuelEU Aviation“<sup>2</sup> (in Prozent des Kraftstoffmixes)



Für den Seeverkehr will man ebenfalls die Nutzung und Produktion nachhaltiger alternativer Kraftstoffe anregen, um den Schwerölverbrauch in diesem Sektor signifikant zu reduzieren. Anders als in der Luftfahrt werden mit der Initiative „ReFuelEU Maritime“ jedoch keine konkreten Beimischungsquoten vorgeschrieben, sondern eine Obergrenze für den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Energiequelle für Schiffe mit einer Tonnage von über 5000 festgelegt. Diese soll alle fünf Jahre weiter reduziert werden, beginnend in 2025 mit 2 Prozent und endend im Jahr 2050 mit 75 Prozent weniger CO<sub>2</sub>-Gehalt.

Mit der Überarbeitung der Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (2014/94) will die Kommission zudem die Standardisierung und flächen-deckende Ausweitung der Kraftstoffinfrastruktur in allen EU-Mitgliedsstaaten insbesondere für Elektro- und Wasserstoffmobilität sicherstellen.

Eine zügige Umsetzung der längerfristigen Quotenregelung in nationales Recht (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) ist ein geeigneter Hebel, um bei der Marktentwicklung die nötige Planungs- und Investitionssicherheit für Produzenten zu schaffen.

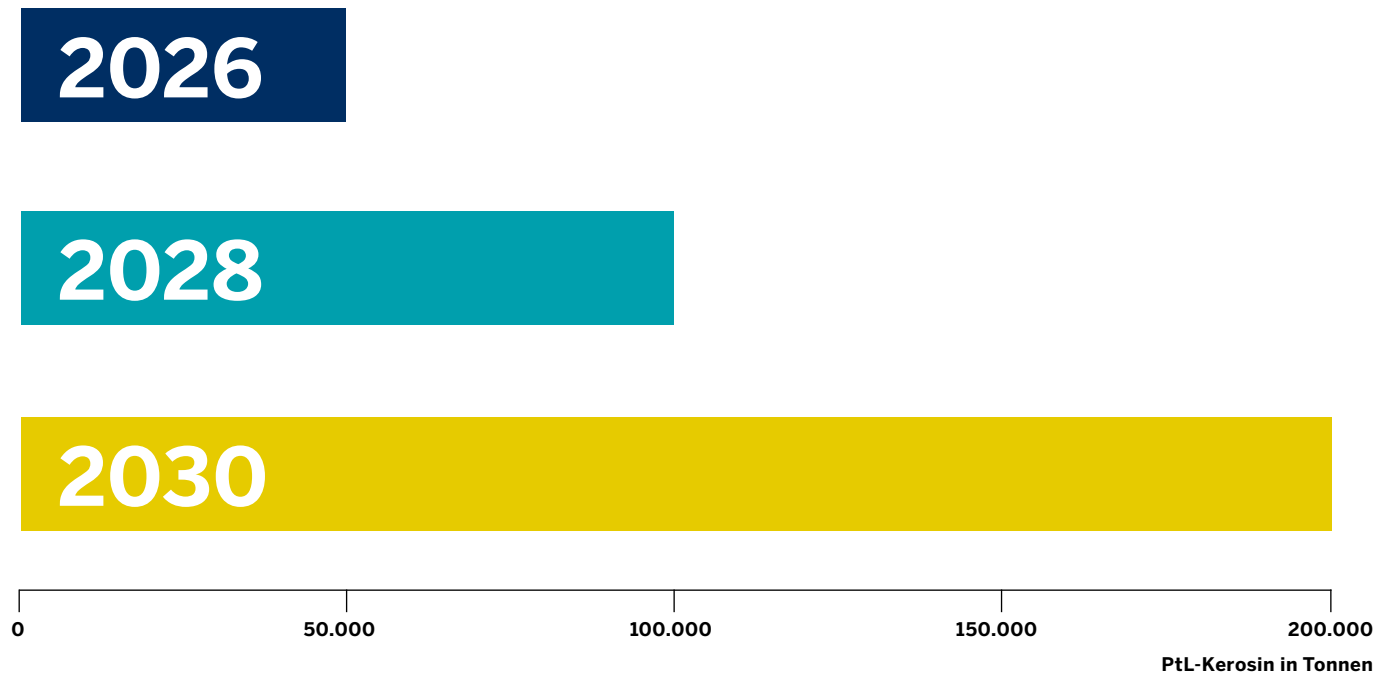


## 2.2 Bundesebene – die Power to Liquid (PtL) Roadmap

Aufbauend auf der Nationalen Wasserstoffstrategie hat die Bundesregierung 2021 eine Power to Liquid (PtL) Roadmap veröffentlicht. Diese zielt ausschließlich auf strombasiertes, synthetisches Kerosin ab. Ziel der Roadmap ist der Einsatz von 200.000 Tonnen synthetischen Kerosins im deutschen Luftverkehr im Jahr 2030. 200.000 Tonnen pro Jahr entsprechen einer Quote von 2 Prozent des Kerosinabsatzes in Deutschland im Jahr 2019.

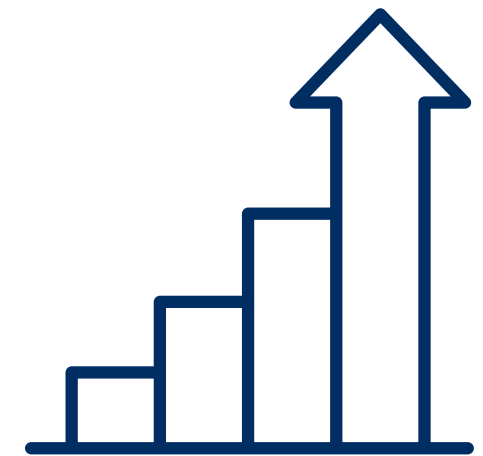
Damit wird in der PtL-Roadmap noch keine feste Quote veranlagt, sondern die Mengen ermittelt, die es für den Einsatz von 2 Prozent synthetischen Kerosins am gesamten Kerosinumsatz benötigt. Die Zielmenge soll mittels Unterstützung der technologischen Entwicklung, Festlegung von Nachhaltigkeitskriterien und der Förderung des Markthochlaufs erreicht werden.

Abbildung 3: Geplanter Hochlauf der Absatzmenge<sup>3</sup>



### Der Markthochlauf soll durch folgende Aktivitäten unterstützt werden:

- Festlegung verbindlicher Ziele für den Ein- und Absatz von erneuerbarem Kerosin auf deutscher, europäischer und internationaler Ebene
- Schaffen der regulatorischen Rahmenbedingungen für einen selbsttragenden Markt für PtL-Kerosin
- Förderung der synthetischen Kerosin-Produktion



## 2.3 Nordrhein-Westfalen

Mit der Wasserstoff-Roadmap NRW hat das MWIDE 2020 den Grundstein für PtX-Technologien gelegt. Die Carbon Management Strategie NRW (CMS) legt zudem die Leitplanken zum nachhaltigen Umgang mit Kohlenstoff in Nordrhein-Westfalen und enthält Maßnahmen, die eine zukunftsfähige Kohlenstoffwirtschaft unterstützen sollen.

Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe stehen in einer engen Beziehung zueinander, allein schon der Tatsache geschuldet, dass Wasserstoff ein Ausgangsstoff für die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen darstellt. In einigen Anwendungsbereichen stellen Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe Alternativen zueinander dar, so z. B. im Schwerlastverkehr. Die erfolgreiche Umsetzung der Wasserstoff-Roadmap NRW ist die Grundlage, um auch Potenziale synthetischer Kraftstoffe in Nordrhein-Westfalen nutzen zu können. Sie ist der Fahrplan für eine zuverlässige, ausreichende und möglichst kostengünstige

Bereitstellung von grünem Wasserstoff. Bis 2025 sollen erste Elektrolyseanlagen für die industrielle Wasserstoffproduktion in Betrieb gehen und die benötigte Infrastruktur aufgebaut werden.

Im Vordergrund der CMS stehen die Abkehr von der weiteren Ausbeutung fossiler Kohlenstoffquellen und der wirtschaftliche Umgang mit nachhaltigen alternativen Kohlenstoffquellen. Insbesondere in Hinblick auf die (petro-)chemische Industrie wird die Ausschöpfung neuer Wertschöpfungspotenziale auf Basis von Carbon Capture and Usage (CCU)-Anwendungen in den Blick genommen, durch die die nordrhein-westfälische Chemie langfristig von einer Kohlenstoffquelle zu einer Kohlenstoffsенke werden könnte. Das größte Marktpotenzial weisen dabei synthetische Kraftstoffe auf.



## 03

16–31

## Synthetische Kraftstoffe: Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsfelder



Synthetische Kraftstoffe erfordern ganz neue Produktionsverfahren. Statt Erdöl sind Strom, Wasser und CO<sub>2</sub> gefragt.



Synthetische Kraftstoffe werden im Gegensatz zu Benzin und Diesel nicht aus Erdöl, sondern aus erneuerbarem Strom, Wasser und CO<sub>2</sub> gewonnen. Somit wird der erneuerbare Strom mittels PtL-Verfahren in flüssige Form umgewandelt. Neben strombasierten, synthetischen Kraftstoffen gibt es noch weitere, alternative Kraftstoffarten. Dazu zählen fortschrittliche Biokraftstoffe der dritten Generation oder der direkte Einsatz von Wasserstoff.

**Das Handlungskonzept adressiert im Schwerpunkt strombasierte, synthetische Kraftstoffe, die mittels Elektrolyse und Syntheseverfahren zu Kraftstoffen weiterverarbeitet werden.** Bei ihrem Transport können grundsätzlich bestehende Infrastrukturen genutzt werden.<sup>4</sup> Sie sind deshalb gut international handelbar und ein weiterer Weg, erneuerbare Energien zu transportieren.

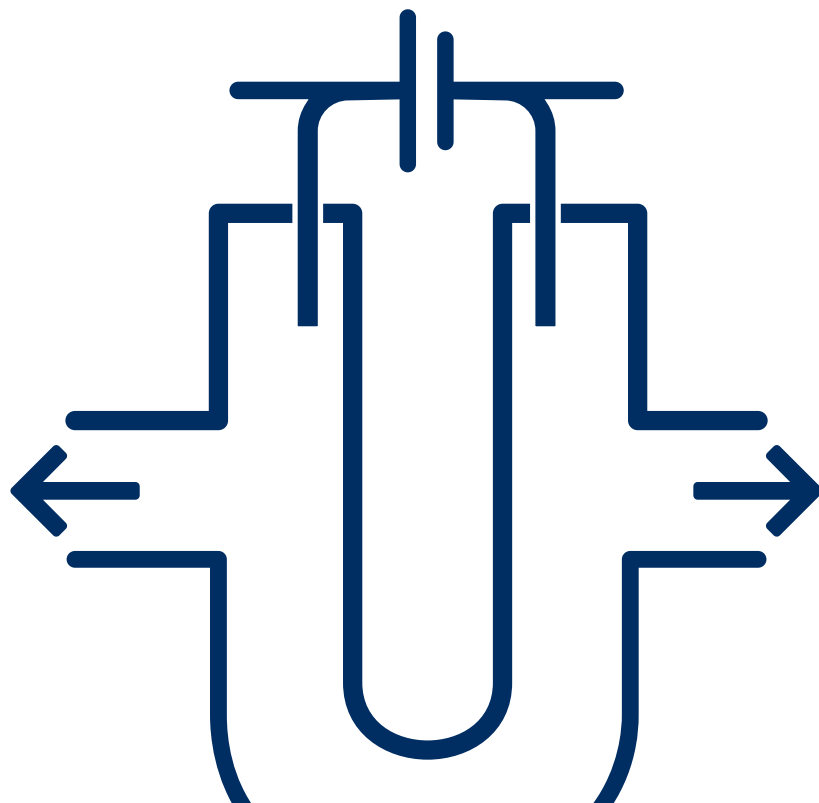
### Blauer Wasserstoff

**Von blauem Wasserstoff ist die Rede, wenn die Herstellung auf Erdgas mittels Dampfreformierung basiert. Nach der Dampfreformierung wird das CO<sub>2</sub> abgeschieden und langfristig gespeichert.**



## Grüner Wasserstoff

**Grüner Wasserstoff wird durch Strom aus erneuerbaren Energien in Elektrolyseuren hergestellt. Elektrolyseure benötigen Strom, um Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) in seine Bestandteile Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) und Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) zu zerlegen.**

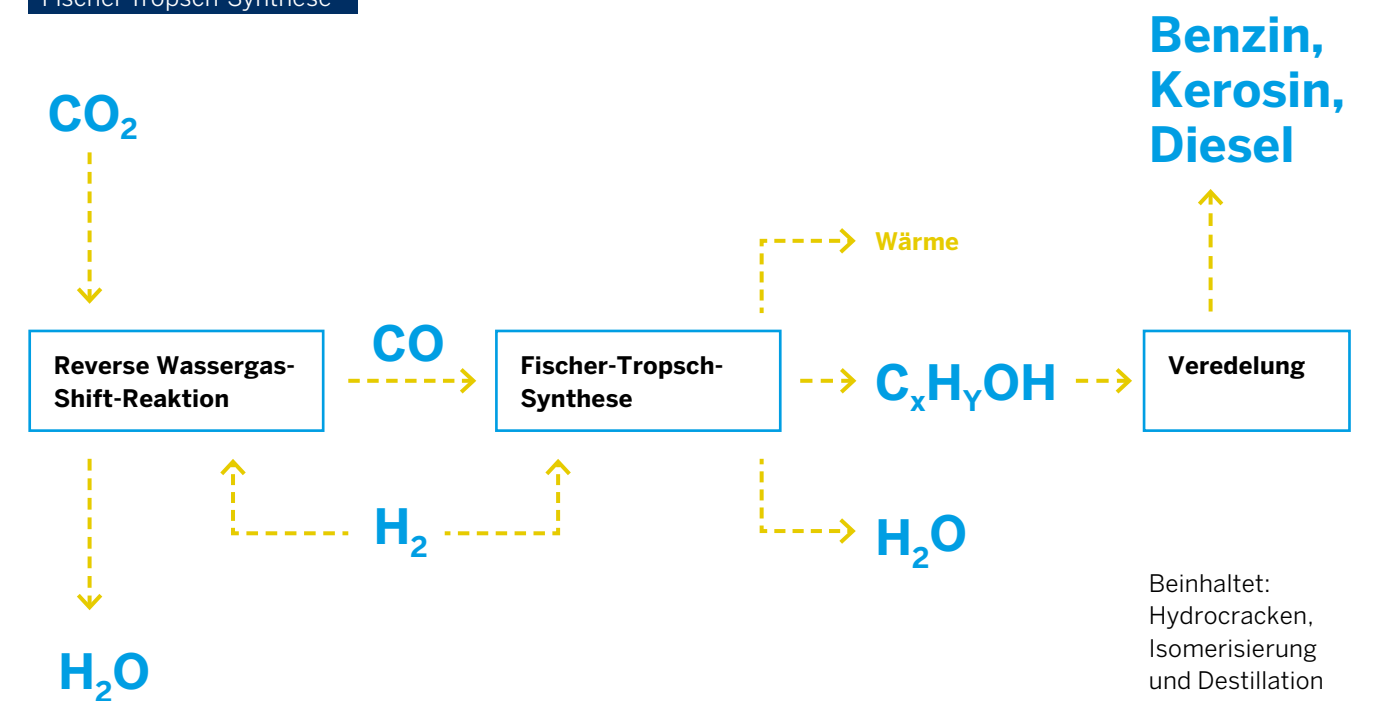


## 3.1 Wie werden synthetische Kraftstoffe hergestellt?

Zur Herstellung wird zunächst ein Wasserstoff-Kohlenmonoxid- oder Wasserstoff-Kohlendioxid-Gemisch erzeugt und anschließend mittels Katalyse zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt.<sup>5</sup> Der Prozess beginnt mit der Wasserstoff-Elektrolyse, bei der Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Für das Verfahren kommt Strom zum Einsatz. Der dadurch gewonnene Wasserstoff, der grundsätzlich selbst als Kraftstoff für Brennstoffzellenanwendungen oder in Verbrennungskraftmaschinen dienen könnte, wird dann mit  $\text{CO}_2$  zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Das  $\text{CO}_2$  kann entweder aus biogenen Quellen oder durch  $\text{CO}_2$ -Abscheidung aus der Umgebungsluft gewonnen werden (nähere Informationen im Unterkapitel 3.3).

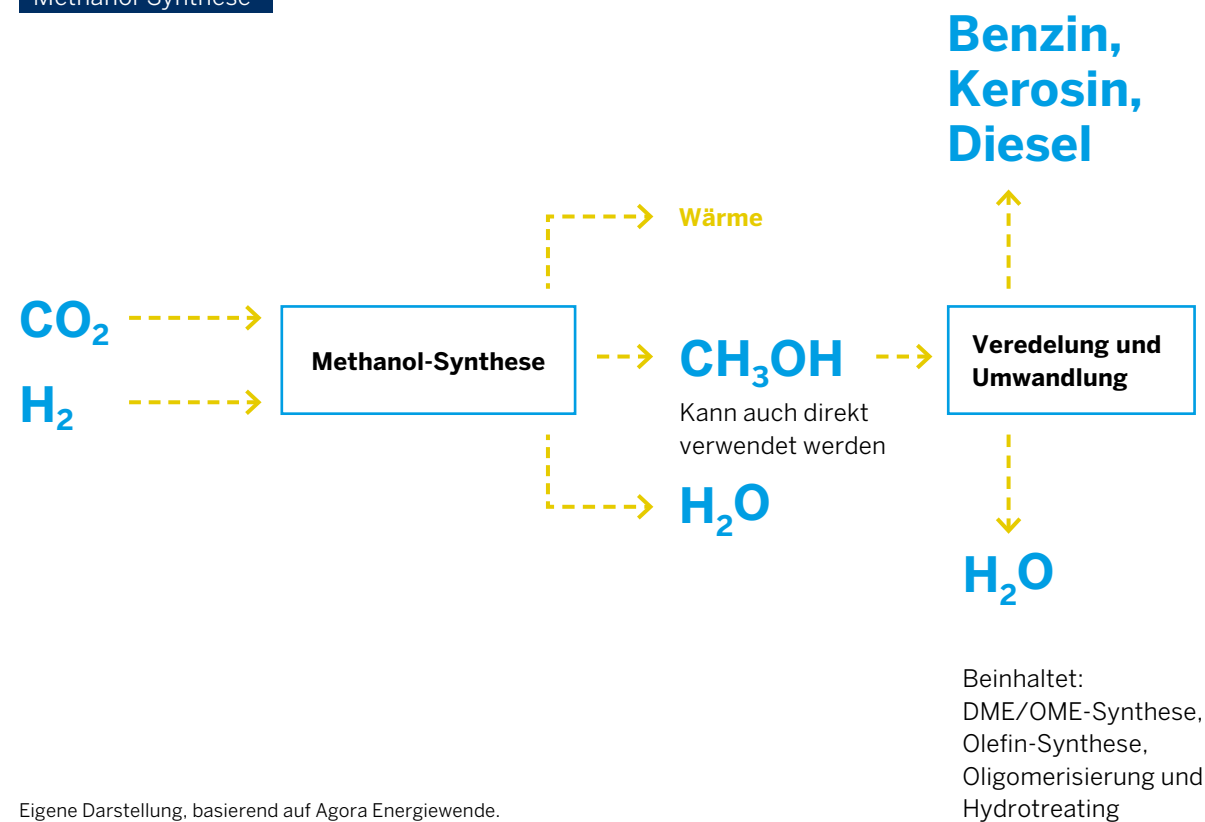
Für die Synthese strombasierter Kraftstoffe kommen derzeit zwei Routen in Frage: die Fischer-Tropsch-Synthese und die Methanol-Synthese. Je nach Modifikation und anschließender Weiterverarbeitung kann ein vielfältiges Produktportfolio abgebildet werden. Das Produkt nach der Fischer-Tropsch-Synthese ist ein e-Crude. Es muss im Anschluss noch zu E-Diesel, E-Benzin oder E-Kerosin raffiniert werden. Der andere Weg zu flüssigen Kraftstoffen führt über die Methanol-Synthese. Methanol kann dann entweder als Basischemikalie in der chemischen Industrie eingesetzt werden oder weiterverarbeitet werden. Methanol kann zu den Kraftstoffen Dimethylether (DME), Oxymethylenether (OME), Octanol und Butanol weiterverarbeitet werden. Derzeit kann nach der Europäischen Norm für Ottokraftstoffe EN 228 bis zu 3 Volumenprozent anderen Kraftstoffen beigemischt werden. In anderen Ländern gibt es bereits Normierungen für eine höhere Beimischung von Methanol.

Abbildung 4: Herstellungsprozess Fischer-Tropsch-Synthese<sup>6</sup>



Eigene Darstellung, basierend auf Agora Energiewende.

Abbildung 5: Herstellungsprozess  
Methanol-Synthese<sup>7</sup>



Eigene Darstellung, basierend auf Agora Energiewende.



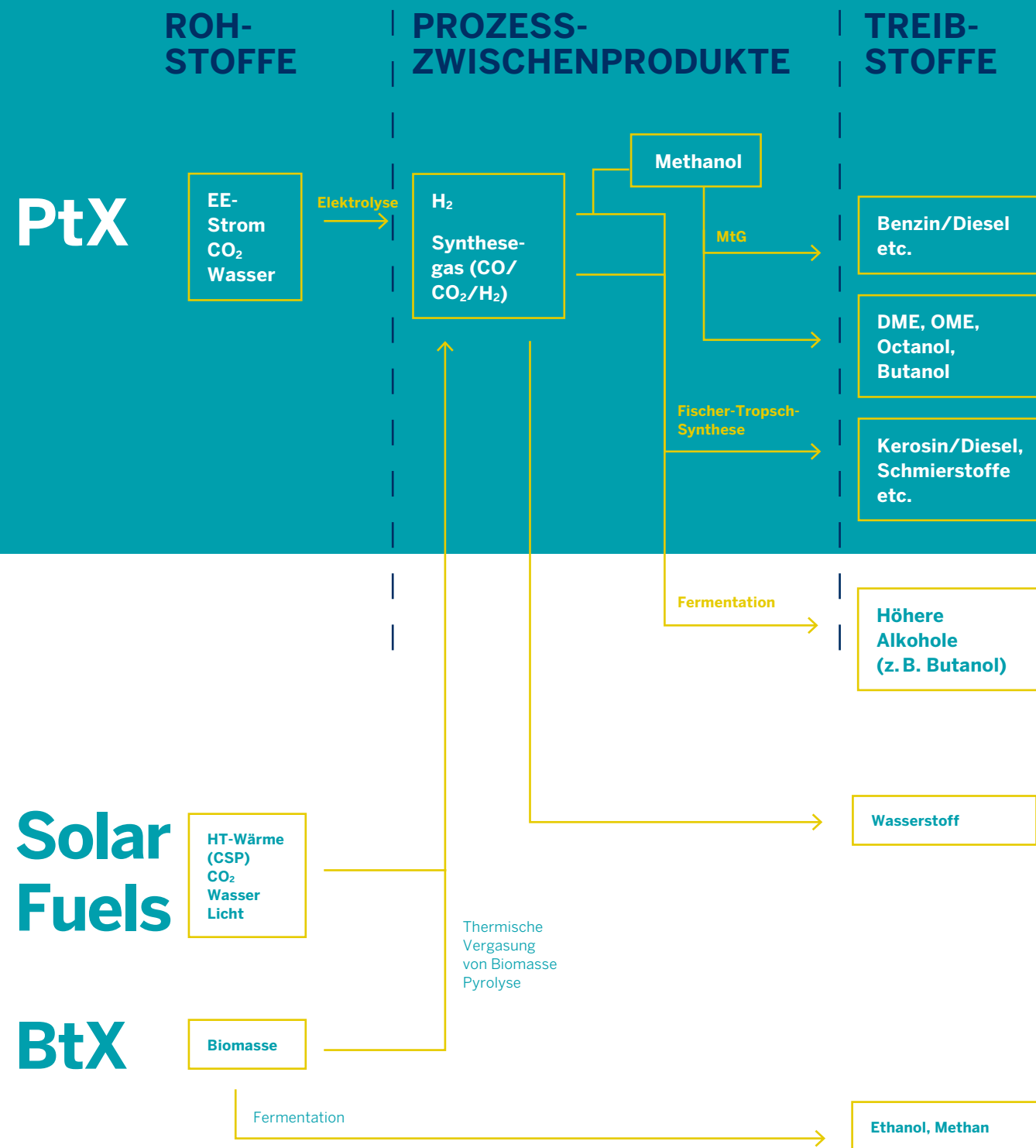
**Biomasse to Liquid (BtL)** Eine weitere Möglichkeit, Kraftstoffe mittels Syntheseverfahren herzustellen, ist auf Basis von Biomasse. BtL-Kraftstoffe basieren auf biogenen Rohstoffen. Die eingesetzte Biomasse sollte nicht aus hierfür angebauten Pflanzen gewonnen werden, sondern aus ohnehin anfallenden Reststoffen. Im ersten Schritt wird die Biomasse mittels Pyrolyse vorbehandelt und anschließend in Synthesegas umgewandelt. Danach ist es möglich, mittels Syntheseverfahren Kraftstoffe herzustellen. Auch hier kann sowohl die Fischer-Tropsch- als auch die Methanol-Synthese eingesetzt werden. Für eine weitergehende CO<sub>2</sub>-neutrale Produktion kommen feste Reststoffe aus der Forst- und Landwirtschaft und der Industrie (z. B. Holzabfälle) in Frage.<sup>8</sup> Das Potenzial für die Herstellung von Kraftstoffen auf Basis von BtL-Verfahren hängt maßgeblich von den verfügbaren biogenen Reststoffen ab.

**Solkraftstoffe** Neben der Herstellung von PtL- und BtL-Kraftstoffen gibt es einen weiteren Technologiepfad für die Erzeugung alternativer Kraftstoffe, der sich für die Produktion in sonnenreichen Gebieten eignet: Solarkraftstoffe. Die Gewinnung der Solarenergie kann beispielsweise thermochemisch erfolgen und anschließend ein solares Synthesegas erzeugt werden. Eine Elektrolyse wird hier nicht benötigt. Das Synthesegas kann wiederum mittels der Methanol-Synthese und der Fischer-Tropsch-Synthese zu Kraftstoffen weiterverarbeitet werden.

Als Ausgangsstoff wird hier Solarenergie benötigt. Diese Art der Herstellung bietet sich deshalb nur in Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung an. Allerdings besteht hierbei das Potenzial, die benötigten Technologien in Nordrhein-Westfalen zu entwickeln, herzustellen und anschließend in sonnenreiche Regionen zu exportieren. Dort wiederum können kostengünstig PtL-Produkte hergestellt werden und perspektivisch zurück nach Nordrhein-Westfalen exportiert werden.<sup>9</sup>



Abbildung 6: Synthetische Kraftstoffe – Technologiepfade



## 3.2 Einsatzfelder synthetischer Kraftstoffe

Synthetische Kraftstoffe können als Reinkraftstoffe oder als Beimischung zu konventionellen Kraftstoffen in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Es ist keine Änderung der Motorentechnik notwendig, es können durch eine Anpassung der Motorentechnik allerdings noch Effizienzverbesserungen sowie Emissionsreduktionen erreicht werden. Ein Einsatz im Mobilitätssektor ist deshalb einfach und schnell umsetzbar.

Synthetische Kraftstoffe sind rein technisch für den Einsatz in allen Bereichen der Mobilität geeignet. Allerdings ist die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen energieaufwendig und mit hohen Verlusten verbunden. Die Einschätzungen zu Umwandlungseffizienzen liegen zwischen 45 und 63 Prozent. Dazu kommen weitere Energieverluste durch den Transport und den Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors. Synthetische Kraftstoffe haben damit eine ca. fünffach geringere Energieeffizienz bei einer Well-to-Wheel (WtW)-Betrachtung als bei der direkten Nutzung von Strom in einem batterieelektrischen Fahrzeug.<sup>10</sup> Bei der Nutzung von gasförmigem, grünen Wasserstoff liegt die Umwandlungseffizienz bei immerhin 61 Prozent, mit einem Potenzial bis zu 70 Prozent.<sup>11</sup> Um klimaneutral zu sein, müssen synthetische Kraftstoffe auf Basis von erneuerbaren Energien hergestellt werden. Ihre geringe Energieeffizienz erfordern bei der Produktion große Strommengen. Langfristig sollte zusätzlich das für die Produktion benötigte CO<sub>2</sub> aus der Luft abgeschieden werden oder aus biogenen Quellen kommen und somit einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf bilden. Die Kohlenstoffquelle hat direkten Einfluss auf die Effizienz in der Herstellung. Derzeit verschlechtert Direct Air Capture (DAC) den Gesamtwirkungsgrad um 10 Prozentpunkte im Vergleich zur Nutzung vorhandener Punktquellen aus Industrie oder Biomasse.<sup>12</sup>

**Synthetische Kraftstoffe haben die gleiche hohe Energiedichte wie konventionelle Kraftstoffe und eignen sich so insbesondere für den Einsatz in Bereichen mit hohen Energiebedarfen, die nicht durch batterie- oder brennstoffzellenelektrische Lösungen defossilisiert werden können.**

Gerade im Flugverkehr scheint eine Elektrifizierung mit Batterien, aber auch mit Wasserstoffbrennstoffzellen, schwierig umsetzbar. Erste Entwicklungen beschränken sich auf Kurzstreckenflüge. Die sehr hohen Energiebedarfe für Langstreckenflüge mit Strahlantrieb können voraussichtlich nur mit synthetischen Kraftstoffen gedeckt werden, sodass E-Kerosin trotz der geringeren Effizienz (WtW) hier die zu präferierende Lösung darstellt.<sup>13</sup> Aufgrund des Handlungsdrucks und fehlender Alternativen können im Flugverkehr, bei zunächst begrenzter Verfügbarkeit von synthetischen Kraftstoffen, bereits früher als in anderen Bereichen in der Mobilität synthetische Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Die Entwicklung neuer Antriebstechnologien und der Bau neuer Flugzeuge wären beim Einsatz synthetischer Kraftstoffe nicht nötig. Auch die vorhandene Infrastruktur könnte weitergenutzt werden. Bei Langstreckenflügen werden auch künftig flüssige Energieträger mit einer hohen Energiedichte gebraucht. Wie sich der Kerosinbedarf bei Kurz- und Mittelstreckenflügen entwickeln wird, hängt auch davon ab, ob ein Modal Shift zur Bahn vorgenommen werden wird. **Wie hoch der Kerosinbedarf insgesamt sein wird, ist deshalb abhängig davon, wie sehr sich alternative Mobilitätskonzepte durchsetzen.**

Auch in der See- und Binnenschifffahrt werden Bedarfe an synthetischen Kraftstoffen erwartet. Aufgrund der hohen Energiebedarfe ist nur eine teilweise Elektrifizierung durch Batterien oder Wasserstoffbrennstoffzellen möglich, sodass auch in Zukunft flüssige Energieträger zum Einsatz kommen müssen. Dies gilt insbesondere für die internationale Seeschifffahrt sowie große Binnenschiffe. Für die Kanalschifffahrt sowie kleine Schiffe, die in und zwischen Häfen fahren, werden voraussichtlich elektrische Lösungen zur Verfügung stehen. Auch hier wird der Bedarf durch die Entwicklung der Verkehrsleistung des Sektors beeinflusst. **So erhöht sich der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen in Szenarien, in denen ein Shift im Güterverkehr von der Straße auf die Wasserstraße angenommen wird.**<sup>14</sup> Zusätzlich ist die Branche durch lange Investitionszyklen gekennzeichnet, sodass auch in Zukunft ein Bestand an Schiffen mit Verbrennungsmotoren zu erwarten ist, der zur Erreichung der Klimaziele mit synthetischen Kraftstoffen betrieben werden muss.

**Im Straßenverkehr werden synthetische Kraftstoffe voraussichtlich maximal in der Bestandsflotte des Güterverkehrs mit verbleibenden Verbrennermotoren oder in Spezialanwendungen mit hohem Energiebedarf, wie Baumaschinen, der Landwirtschaft oder im Militär, Anwendung finden.**<sup>15</sup> Je höher die nötigen Reichweiten und das Gewicht der betrachteten Anwendung sind, umso größer wird der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen sein. Der prognostizierte Bedarf im Straßenverkehr hängt im Wesentlichen von den Entwicklungen bei den Elektrifizierungstechnologien Batterie und Brennstoffzelle ab.<sup>16</sup> Für die Fahrzeugklassen N1 und N2 sind hier bereits Lösungen verfügbar. Anwendungen im Bereich N3 werden gerade erst entwickelt. In Szenarien, wo hier weitere Innovationen erwartet werden, verringert sich der Bedarf an synthetischen Kraftstoffen entsprechend.

Weitere Bedarfe für PtX-Produkte ergeben sich in der chemischen Industrie. Hier werden synthetische Kraftstoffe aber nicht als Energieträger, sondern als Ausgangsstoff verwendet. Bisher konventionell produzierte Basischemikalien wie Methanol oder Ammoniak müssen künftig auf Basis von grünem Wasserstoff hergestellt werden. Zusätzlich stellt Naphtha einen wichtigen Ausgangsstoff für die chemische Industrie dar. Dieser wird derzeit in Raffinerien aus Rohöl produziert. Durch ihre geografische Nähe zu wichtigen Chemiestandorten kommt den Raffinerien in NRW hier eine besondere Bedeutung zu. Auch hier werden künftig PtX-Produkte als Ausgangsstoff für eine klimaneutrale Produktion genutzt werden.<sup>17</sup>

**Synthetische Kraftstoffe sind eine sinnvolle und wichtige Ergänzung zu batterieelektrischen Fahrzeugen und dem direkten Einsatz von Wasserstoff. Die Umwandlungsverluste sind hoch und deshalb ein wichtiger Faktor, da erneuerbare Energien noch nicht ausreichend verfügbar sind. Der Einsatz muss mit Bedacht gewählt werden. Entscheidend sind die jeweiligen Leistungsanforderungen und die zur Verfügung stehenden Alternativen.** Wie groß der Einsatz synthetischer Kraftstoffe bei den jeweiligen Endanwendungen sein wird, kann derzeit noch nicht genau beziffert werden. Fest steht aber: Sie werden gerade bei ehrgeizigen Klimazielen eine Rolle spielen. Die chemische Industrie wird weiterhin einen hohen Bedarf an Methanol und Naphtha aufweisen, in der Luftfahrt wird die Nachfrage nach Kerosin bei Langstrecken bestehen bleiben und auch die Seeschifffahrt wird zum Teil noch auf flüssige Kraftstoffe angewiesen sein. **Das Land NRW forciert den Einsatz synthetischer Kraftstoffe dort, wo effizientere Technologien keine oder nur sehr schwer Anwendung finden können.** Eine ausschließliche Fokussierung auf ein Endprodukt ist aber in Anbetracht der technischen Abhängigkeiten in der Produktion und den künftigen Bedarfen nicht zielführend.



## 3.3 Wann sind synthetische Kraftstoffe klimaneutral?

**Damit synthetische Kraftstoffe einen echten Beitrag zum Klimaschutz leisten, müssen sie langfristig klimaneutral hergestellt werden. Aber auch auf dem Weg zu einer vollständig klimaneutralen Produktion können synthetische Kraftstoffe schon einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, wenn die CO<sub>2</sub>-Bilanz insgesamt besser ist als die von fossilen Kraftstoffen.**

Um die Klimabilanz bewerten zu können, sind viele einzelne Punkte entlang der Produktionskette und des Bilanzierungsrahmens wichtig. Der Strom für die Elektrolyse muss aus erneuerbaren Quellen kommen. Gleichzeitig bestimmen die Stromgestehungskosten die Wirtschaftlichkeit und sind deshalb ein entscheidender Faktor bei der Wahl künftiger Standorte für die Wasserstoffproduktion. Allerdings sind sonnenreiche Regionen nicht zwingend auch wasserreiche Regionen. Das für die Elektrolyse benötigte Wasser darf deshalb weder die lokale Trinkwasserversorgung noch bestehende Ökosysteme beeinträchtigen bzw. aus dem Gleichgewicht bringen.<sup>18</sup> Eine Lösung können hier Meerentsalzungsanlagen sein, die dann wiederum nur mit zusätzlichem, erneuerbarem Strom betrieben werden sollten. Auch das CO<sub>2</sub> kann aus unterschiedlichen Quellen kommen. Je nach Bezugsquelle ändern sich die Bilanz und auch die Effizienz. **Da die Wertschöpfungskette synthetischer Kraftstoffe global ausgestaltet sein wird, braucht es vor allem auch Nachhaltigkeitsstandards bzw. ein Zertifizierungssystem innerhalb und außerhalb des EU-Rechtsraums.**

### CO<sub>2</sub> aus industriellen Prozessen

CO<sub>2</sub> kann aus fossilen Verbrennungsprozessen und industriellen Punktquellen gewonnen werden. Hierfür kommen Technologien wie Absorption, Adsorption, chemisches Looping, Membran-Gastrennung oder Gashydrat-Technologien in Frage.<sup>19</sup> CO<sub>2</sub> aus industriellen Punktquellen wird mittelfristig noch verfügbar sein. Prozessbedingte Emissionen werden als CO<sub>2</sub>-Emissionen definiert, bei denen das CO<sub>2</sub> als Produkt einer chemischen Reaktion entsteht, die keine Verbrennung ist.<sup>20</sup> Beispiele finden sich in der Roheisenherstellung, Zement- und Kalkproduktion und der Chemiebranche. Im Rahmen der klimaneutralen Transformation der Industrie werden zwar große Mengen CO<sub>2</sub> eingespart. Aber dennoch ist heute bereits klar, dass im klimaneutralen NRW im Jahr 2045 trotzdem immer noch unvermeidbare Emissionen anfallen werden. Unter unvermeidbar sind die CO<sub>2</sub>-Mengen zu verstehen, deren Entstehung trotz Optimierung des Produktionsverfahrens oder des Produktes nicht vermieden werden kann und bei denen keine alternativen Prozesse und keine alternativen Produkte oder Ressourcen für denselben Anwendungsfall verfügbar sind bzw. deren Potenziale zu stark begrenzt sind. Die verbleibenden industriellen CO<sub>2</sub>-Mengen in einem klimaneutralen NRW belaufen sich nach derzeitigem Kenntnisstand je nach Szenario auf 7 bis 35 Mio. Tonnen. Auf die Höhe der verbleibenden CO<sub>2</sub>-Mengen hat in NRW unter anderem auch die Entwicklung der Steamcracker einen großen Einfluss. Zum jetzigen Zeitpunkt kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass durch technische Innovationen auch diese Mengen zumindest teilweise in Zukunft vermeidbar sind.

Die Nutzung von CO<sub>2</sub> aus industriellen Prozessen zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen in NRW ist vor allem für die Übergangsphase attraktiv. Die Nutzungsdauer des CO<sub>2</sub> wird verlängert, es handelt sich allerdings trotzdem nicht um einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf. **Von CO<sub>2</sub>-Neutralität kann nur gesprochen werden, wenn das für die Produktion verwendete CO<sub>2</sub> einen geschlossenen Kreislauf mit der Atmosphäre bildet, sprich vorher aus der Atmosphäre abgeschieden wurde oder von biogenen Quellen gewonnen wurde.** Außerdem muss vermieden werden, dass hier eine Pfadabhängigkeit angelegt wird, die eine Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Produktion unattraktiv macht und somit das Erreichen der Klimaschutzziele gefährdet.<sup>21</sup>

## Graues CO<sub>2</sub>

**Graues CO<sub>2</sub> entsteht bei der Verwertung fossiler Kohlenstoffe (Erdöl, Erdgas, Kohle, Kalk). Die Nutzung von grauem CO<sub>2</sub> zur Herstellung von Produkten, in welchen der Kohlenstoff nicht permanent chemisch gebunden ist, ist daher nicht klimaneutral.**

Dennoch können durch den Einsatz von grauem CO<sub>2</sub> die Gesamtemissionen gesenkt werden, wenn dadurch konventionelle fossile Kohlenstoffquellen, deren Verwertung zur Entstehung weiterer CO<sub>2</sub>-Mengen führen würde, reduziert werden. Mittel- und langfristig sollte graues CO<sub>2</sub> somit nur in Anwendungen zum Einsatz kommen, in denen eine (zeitnahe) Freisetzung ausgeschlossen werden kann.

## CO<sub>2</sub> aus biogenen Quellen

Für den CO<sub>2</sub>-Bezug aus biogenen Quellen bieten sich Biogasanlagen, Bioethanol-Anlagen und Biomasseheizkraftwerke an. **Die Nutzung von Biomasse wird als klimaneutral betrachtet, sofern bei der Verwertung maximal so viel CO<sub>2</sub> frei wird, wie beim Wachstum aufgenommen wurde.**

## Direct Air Capture (DAC)

Bei der Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft können – anders als bei Nutzung von industriellen Abgasen – diffuse Quellen verwendet werden. Bei der sogenannten Direct-Air-Capture(DAC)-Technologie wird Umgebungsluft mittels Ventilatoren auf ein Sorptionsmittel geleitet. Im Anschluss muss das CO<sub>2</sub> gebunden werden. Dies kann entweder durch absorbierende oder adsorbierende Substanzen erfolgen. Das CO<sub>2</sub> wird dann wieder vom Sorptionsmittel getrennt. Für DAC lassen sich grob zwei Technologie-Gruppen definieren: DAC<sub>highTemp</sub> und DAC<sub>lowTemp</sub>.<sup>22</sup>

Bei DAC<sub>highTemp</sub>-Verfahren wird CO<sub>2</sub> als Calciumcarbonat gebunden und anschließend mittels Kalzinierung weiterbehandelt, sodass am Ende CO<sub>2</sub> in konzentrierter Form zur Verfügung steht. Für die Kalzinierung sind sehr hohe

## Grünes CO<sub>2</sub>

**Grünes CO<sub>2</sub> entsteht bei der Verwertung biogener Kohlenstoffe (Biomasse). Die Nutzung von grünem CO<sub>2</sub> ist unter denselben Umständen klimaneutral wie die Nutzung von Biomasse selbst.**

Auch Anwendungen, in welchen das CO<sub>2</sub> nicht permanent chemisch gebunden wird, wie z. B. synthetische Kraftstoffe, können somit auf Basis von grünem CO<sub>2</sub> klimaneutral gestaltet werden. Ersetzt das grüne CO<sub>2</sub> fossile Kohlenstoffquellen oder kommt bei der Herstellung von Produkten zum Einsatz, in denen der Kohlenstoff permanent chemisch gebunden ist, ist sogar von einem (zeitweisen) positiven Klimaeffekt auszugehen.

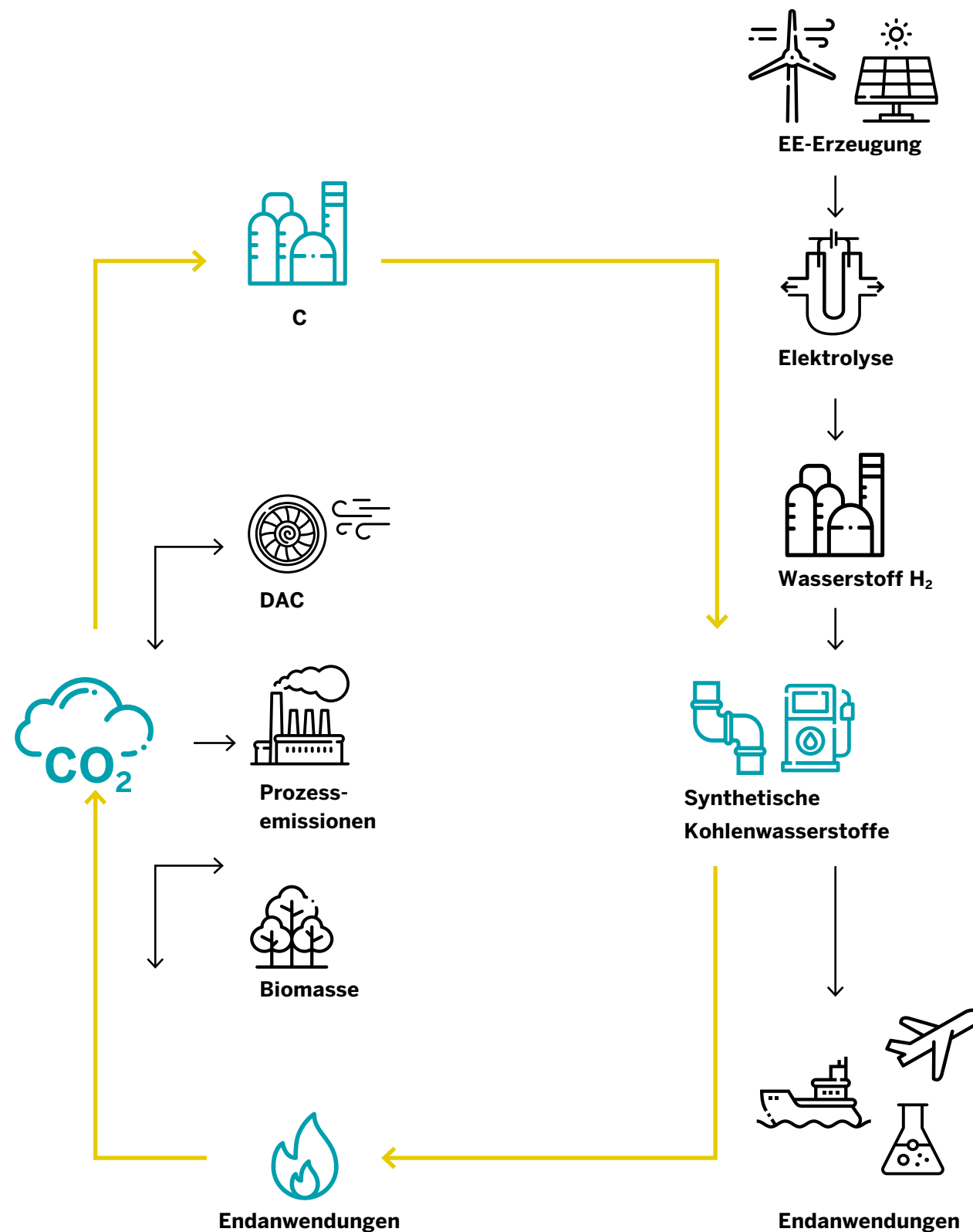
Temperaturen (850 bis 1000 Grad Celsius) notwendig.<sup>23</sup> Die kanadische Firma Carbon Engineering betreibt eine Demonstrationsanlage mit diesem Verfahren. Den Energiebedarf deckt sie mit Erdgas. Laut Angaben der Firma Carbon Engineering kann die Anlage auf 1 Mio. CO<sub>2</sub> pro Jahr skaliert werden. Der Einsatz von Erdgas führt jedoch dazu, dass für jede Tonne CO<sub>2</sub>, die aus der Umgebungsluft abgeschieden wird, wieder eine halbe Tonne fossiles CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. Dieses wird zwar durch einen zusätzlichen Nachverbrennungsprozess nur teilweise freigesetzt, aber es handelt sich hierbei nach derzeitigem Stand trotzdem nicht um einen komplett geschlossenen Kohlenstoffkreislauf. Bei DAC<sub>lowTemp</sub>-Verfahren wird das CO<sub>2</sub> in einer Aminlösung adsorbiert und bei einer Temperatur von ca. 100 Grad Celsius regeneriert. Der Energiebedarf ist geringer und in manchen Fällen ist die Nutzung der Abwärme aus Elektrolyseanlagen, Industrie- oder Syntheseanlagen möglich.<sup>24</sup> Im Besonderen bei dem DAC<sub>lowTemp</sub>-Verfahren sind noch Effizienzsteigerungen möglich, da es sich um ein vergleichsweise neues Verfahren handelt. DAC ermöglicht es, synthetische Kraftstoffe mit einem geschlossenen

Kohlenstoffkreislauf zu produzieren. Mithilfe der DAC-Technologie kann aber nicht nur CO<sub>2</sub> der Atmosphäre entzogen werden, um es für die Produktion synthetischer Kraftstoffe zu verwenden. **DAC hat perspektivisch das Potenzial, „negative Emissionen“ zu erzielen (Direct Air Capture and Storage – DACCS).**

Den vielen Vorteilen der DAC-Technologie stehen einige Herausforderungen gegenüber. Neben der bisher ausgebliebenen Skalierung, der Uneinigkeit über die technische Reife, den Verbesserungspotenzialen bei der Energieeffizienz und der fehlenden Wirtschaftlichkeit ist auch die CO<sub>2</sub>-Effizienz nur unter bestimmten Voraussetzungen gegeben. Bisher gibt es einige Demonstrationsanlagen und modulare Anlagen, ein großskaliger Einsatz wurde bisher aber noch nicht umgesetzt. Die Kosten pro Tonne CO<sub>2</sub> liegen je nach Verfahren derzeit zwischen 500 und 1000 Euro. Für die Rentabilität einer großtechnischen Anlage ist der entsprechend zu erwartende Absatzmarkt entscheidend.



Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung synthetischer Kraftstoffe als Teil eines Kohlenstoffkreislaufes<sup>25</sup>



### CO<sub>2</sub>-Effizienz von DAC-Anlagen und NRW-Perspektiven

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Umgebungsluft ist wesentlich geringer als bei industriellen Punktquellen oder gar bei Kraftwerken. Zum Vergleich: Bei der Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus einem Kraftwerk ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration 250 bis 300 Mal höher als bei der Abscheidung aus der Umgebungsluft. Theoretisch ist der Energiebedarf bei Abscheidung aus der Umgebungsluft 2 bis 4 Mal höher.<sup>26</sup> Nicht nur der Strom für die Wasserstoff-Elektrolyse sollte aus erneuerbaren Energien kommen, sondern auch der Energiebedarf von DAC-Anlagen damit gedeckt werden. Ein weiterer Aspekt, der deshalb bei der Weiterentwicklung der Technologie in den Fokus genommen werden sollte, ist die Energieeffizienz. Hier müssen noch die Effizienzpotenziale gehoben werden.

Eine der ersten kommerziellen DAC-Anlagen wird von dem in NRW ansässigen Schweizer Unternehmen Climeworks produziert. Das Unternehmen arbeitet mit dem DAC<sub>lowTemp</sub>-Verfahren und bietet bereits kommerziell modulare DAC-Anlagen an, die theoretisch skalierbar sind.

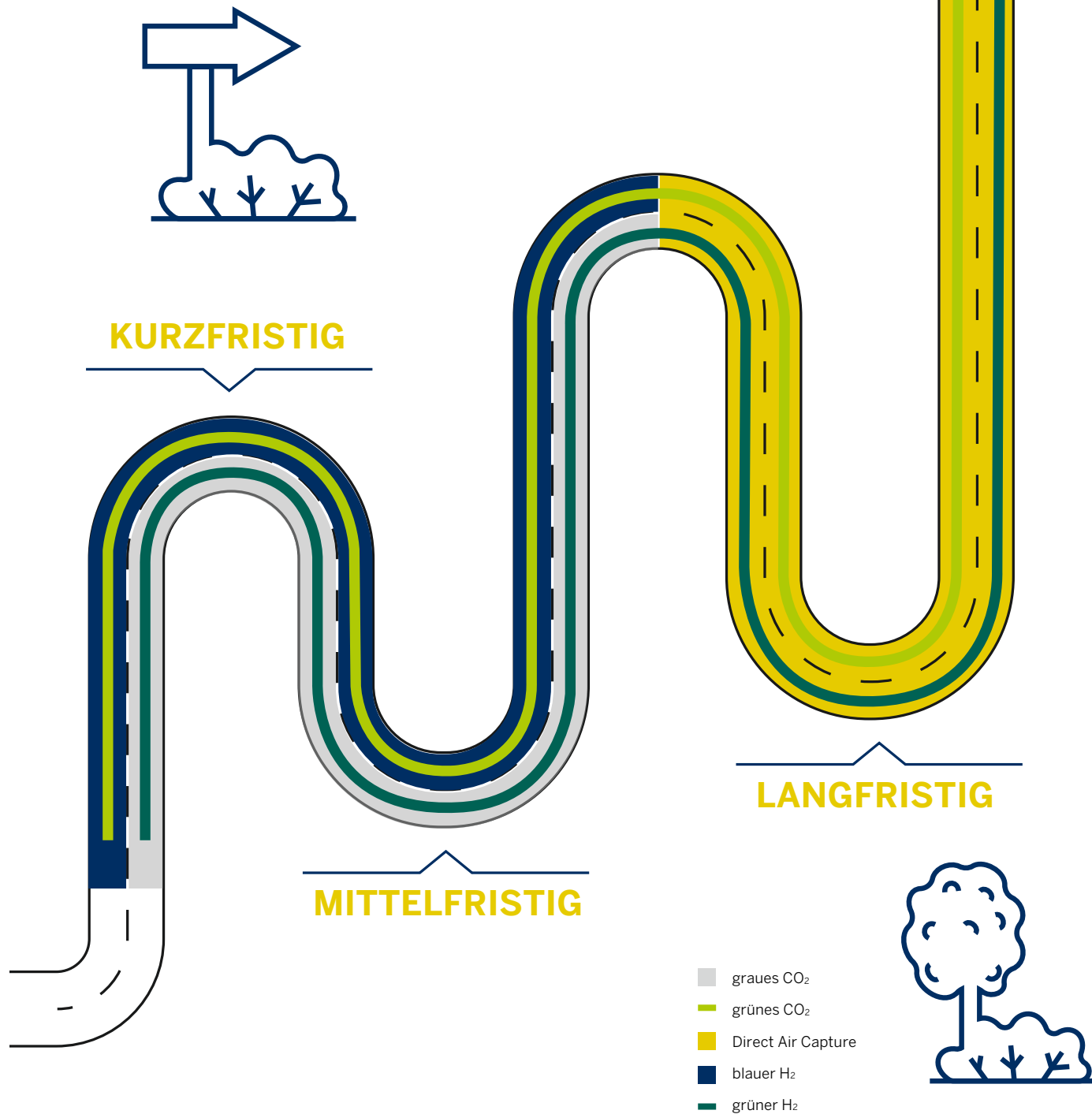
Inwieweit sich NRW zukünftig für DAC-Anlagen im breiten Maßstab eignet, ist allerdings noch fraglich. So ist eine Abscheidung aus der Luft derzeit mit 600 bis 1000 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> noch um ein Vielfaches teurer als die Abscheidung aus industriellen Punktquellen. Allerdings sollte die Entwicklung von DAC-Anlagen vorangetrieben werden, da sie langfristig nicht nur bei der Produktion synthetischer Kraftstoffe zum Einsatz kommen können, sondern auch bei DACCS.

Um den Markthochlauf frühzeitig anzukurbeln, hat die Wasserstoff-Roadmap NRW blauen Wasserstoff als Brückentechnologie auf dem Weg zur grünen Wasserstoffwirtschaft definiert. Mindestens mittelfristig ist auch eine Nutzung von grauem CO<sub>2</sub> sinnvoll. Die Nutzung von grünem CO<sub>2</sub> kann bereits früher als DAC erfolgen. DAC-Technologien und der Anlagenbau sollen gefördert werden, sodass langfristig hier alle Potenziale ausgeschöpft werden können.



Für Nordrhein-Westfalen ergibt sich deshalb folgender CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>-Nutzungsfahrplan:

Abbildung 8: Fahrplan für die CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>-Nutzung

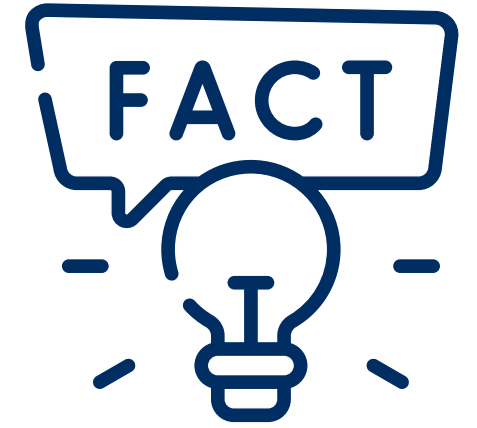


Eigene Darstellung

Die Kernaussagen des Kapitels:

1

Synthetische Kraftstoffe sollen vor allem da eingesetzt werden, wo technisch keine andere Möglichkeit besteht: (Langstrecken-)**Flugverkehr**, (See-)**Schifffahrt** und als **Grundstoff in der chemischen Industrie**.



2

Auf lange Sicht sollten synthetische Kraftstoffe klimaneutral hergestellt werden, um einen maximalen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Langfristig sollten sie deshalb basierend auf grünem H<sub>2</sub>, grünem CO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> durch Abscheidung aus der Umgebungsluft produziert werden. Für einen erfolgreichen Markthochlauf, ist aber eine Übergangsphase sinnvoll in der auch blauer H<sub>2</sub> und graues CO<sub>2</sub> genutzt wird.

3

Es braucht auf europäischer Ebene ein effizientes Zertifizierungssystem. Langfristig muss sich auch international auf eine harmonisierte Zertifizierung geeinigt werden.

## 04

32–39

Forschung und  
Entwicklung

Forschung und Entwicklung sind der Schlüssel für den Erfolg synthetischer Kraftstoffe. Die hervorragende Forschungslandschaft in Nordrhein-Westfalen ist ein zentraler Standortfaktor.



Die Herstellung synthetischer Kraftstoffe basiert auf einer vielschrittigen und komplexen Prozesskette. Forschung und Entwicklung kommt deshalb gerade hier eine Schlüsselrolle zu: Sie ermöglicht technische Innovationen und erkennt Optimierungspotenziale. Ist die technische Machbarkeit in vielen Bereichen grundsätzlich erforscht, besteht bei der großskaligen Umsetzung der Bedarf an wissenschaftlicher Begleitung. Die Forschung ist der starke Partner der Industrie bei der Entwicklung neuer Klimaschutztechnologien und damit unabdingbar für die Positionierung auf dem Weltmarkt.

Der Forschung in Nordrhein-Westfalen kommt damit eine Schlüsselrolle zu bei dem Bestreben, Klimaschutz und wirtschaftliche Stärke gemeinsam voranzubringen.

In Nordrhein-Westfalen findet sich eine – weltweit wohl einzigartige – Konzentration von absoluter Grundlagenforschung bis hin zur anwendungsorientierten Forschung. Mit bereits laufenden Verbundprojekten beweist Nordrhein-Westfalen außerdem, wie eine starke Allianz von Forschung und Wirtschaft gestaltet wird. Damit hat das Land im Bereich Forschung und Entwicklung zu synthetischen Kraftstoffen eine Führungsrolle inne.

## 4.1 Übersicht der Universitäten und Hochschulen in NRW

**Kopernikus-Projekt Power-to-X (P2X)** Ein wichtiges Leitprojekt ist das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Kopernikus-Projekt Power-to-X (P2X). Das Konsortium besteht aus 18 Forschungseinrichtungen und 27 Industrieunternehmen und wird durch das FZ Jülich und die RWTH Aachen koordiniert. Zentrale Forschungsthemen sind u. a. mittel- und großskalige Elektrolysesysteme zur Herstellung von Wasserstoff aus überschüssigem Wind- und Solarstrom sowie die Erprobung verschiedener Prozessrouten für Power-to-Liquid und Power-to-Chemicals (z. B. Methanol, Fischer-Tropsch-Fuels, Alkohole höherer Ordnung), die Entwicklung von Prozessdesigns, Pilot- und Demonstrationsprojekten, Konzepte für Wasserstoff-Tankstellen sowie den Transport von Wasserstoff und der Vergleich alternativer Umwandlungspfade anhand von CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und Kosten.



Abbildung 9: Übersicht der Universitäten und Hochschulen in NRW

### 1 RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

→ Lehrstuhl für Technische Chemie

Themenschwerpunkt sind industriell relevante Prozesse, zu denen auch energietechnische Fragestellungen gehören. Im Bereich Power-to-X zählt hierzu die Entwicklung geeigneter Katalysatoren.

### 2 VIRTUELLES INSTITUT STROM ZU GAS UND WÄRME (VI SGW)

Am VI SGW wird die Machbarkeit von Syntheserouten wie der Fischer-Tropsch-Synthese untersucht. Hierzu bündelt es die Kompetenzen aus sieben Forschungseinrichtungen zu Energietechnik und -wirtschaft.

### 3 MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR CHEMISCHE ENERGIEKONVERSION

→ Abteilung Molekulare Katalyse

Hier findet Grundlagenforschung statt, um Rohstoffe als Basis für chemische Produkte und Kraftstoffe zu nutzen. Im Vordergrund steht dabei das Verständnis von molekularen Prinzipien der Katalyse.

### 4 WUPPERTAL INSTITUT (WI)

→ Zukünftige Energie- und Industriesysteme

Das WI untersucht zum Beispiel im Projekt MENA-Fuels die Rolle der MENA Region (Middle East/North Africa) bei der Versorgung Deutschlands und der EU mit synthetischen Kraftstoffen und deren Vorprodukten. Am Ende der Laufzeit soll ein Leitfaden mit Handlungsoptionen für die Erforschung, Entwicklung, Produktion, Nutzung und Markteinführung von synthetischen Kraftstoffen stehen. Das Projekt ist Teil der Förderinitiative „Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).

### 5 DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR)

→ Projekt Future Fuels

Am DLR wird die Herstellung synthetischer Kraftstoffe mit konzentrierter Sonnenenergie in Verbindung mit einem Hochtemperatur-Elektrolyseur erforscht.

### 6 FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

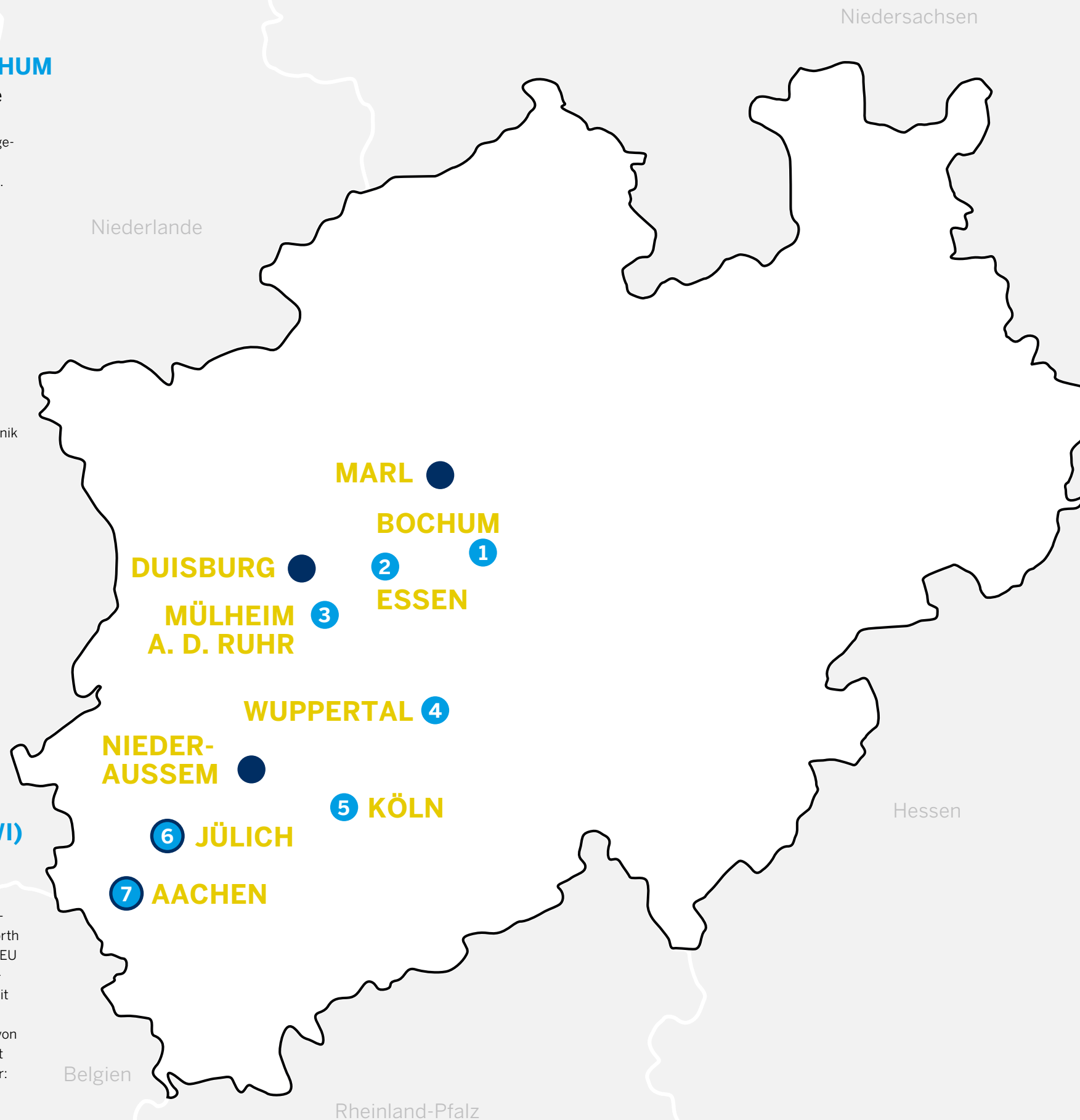
→ Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)

Die Forschung am IEK deckt Fragestellungen zur Elektrolyse, zu Brennstoffzellen, zur Wasserstoff-Infrastruktur, zur Kraftstoffsynthese und Systemtechnik sowie zur techno-ökonomischen Systemanalyse ab.

### 7 RWTH AACHEN

→ Fuel Science Center (FSC) & Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME)

Am FSC wird an Grundlagen und Methoden zur Entwicklung von alternativen Kraftstoffen aus erneuerbarem Strom und biobasierten Kohlenstoffquellen geforscht. Der Forschungsschwerpunkt des TME im Bereich synthetische Kraftstoffe liegt hingegen auf Methanol. Themen sind die Standardisierung von Methanol-Kraftstoffen, die Methanol-Produktion über regenerative Pfade, die Handhabung von Methanol sowie die notwendige Infrastruktur.



● Verbundprojekte ● Universitäten und Hochschulen

## 4.2 Allianz von Wissenschaft und Industrie made in NRW – Verbundprojekte

Forschung kommt erst dann richtig zum Tragen, wenn sie ihren Weg in die Anwendung findet. Hier ist Nordrhein-Westfalen Vorreiter: **Starke Partnerschaften zwischen Forschung und Industrie machen Nordrhein-Westfalen zum Innovationsland.** Gerade in der jetzigen Phase sind integrierte Ansätze notwendig, die Technologien erproben, neue Materialien testen und die verschiedenen Perspektiven des komplexen Themas synthetische Kraftstoffe gemeinsam denken. Nordrhein-Westfalen bietet diese Ansätze und ist damit ein hervorragender Standort, um synthetische Kraftstoffe weiter voranzubringen.

Mit einer innovativen Versuchsanlage am Standort Marl erforschen Siemens und Evonik im Projekt **Rheticus** CO<sub>2</sub> als alternativen Rohstoff für die Herstellung von Spezialchemikalien. Die Anlage kombiniert erstmals erneuerbare Energien, Elektrolyseverfahren und Fermentation. Sie ermöglicht so die Zusammenführung von Energie- und Chemiesektor und den Zugang zu einer klimafreundlichen Gestaltung der chemischen Industrie.

Das gemeinsame Projekt **C<sup>3</sup>-Mobility** (Closed Carbon Cycle Mobility) von FEV, Ford und dem FZ Jülich ist einer von insgesamt 15 Forschungsverbänden der Forschungsinitiative „Energiewende im Verkehr“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Die Initiative bildet eine Schnittstelle zwischen dem Energie- und dem Verkehrssektor. So können für die Erforschung neuer und strombasierter Kraftstoffe für den Transport zu Straße, zu Wasser und zu Luft vielfältige Synergien genutzt und interdisziplinäre Ansätze vernetzt werden. Auch die politischen Handlungsoptionen zum Erreichen der Klimaschutzziele von Paris werden durch die Sektorkopplung von Energie und Verkehr erweitert.

Die ersten Projekte – wie auch C<sup>3</sup>-Mobility – sind bereits im Herbst 2018 gestartet. Sie alle betrachten die Herstellung, den Transport oder die Nutzung strombasierter Kraftstoffe aus unterschiedlichen Blickwinkeln. Der Schwerpunkt des Projekts ist die Nutzung und Weiterverarbeitung von Methanol zu neuen regenerativen Kraftstoffen für Benzin- und Dieselmotoren: DME, OME, Octanol, Butanol sowie Methanol to Gasoline.

Das EU-Projekt **ALIGN-CCU** hat als Ziel, eine Blaupause einer Kohlendioxidwirtschaft aufzubauen. Hierfür werden in Demonstrations- und industriellen Anlagen CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Transport, -Speicherung und -Nutzung untersucht. Ebenso werden die Akzeptanz untersucht und Maßnahmen erarbeitet. In NRW wird eine CCU-Anlage an dem Kraftwerk Niederaußem von RWE im Demonstrationsmaßstab betrieben. Weitere Projektpartner sind unter anderem FEV, die RWTH Aachen und das FZ Jülich. Insgesamt wirken 34 Industrie- und Forschungspartner in sechs europäischen Regionen mit.

Das Projekt **Carbon2Chem** erforscht, wie aus Hüttengasen der Stahlproduktion wertvolle Vorprodukte für Kraftstoffe, Kunststoffe oder Düngemittel werden. Carbon2Chem soll 20 Millionen Tonnen des jährlichen deutschen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der Stahlbranche wirtschaftlich nutzbar machen. Die zweite Phase von Carbon2Chem wird die entwickelten Verfahren für die großtechnische Umsetzung validieren und so die Grundlage für den emissionsarmen Betrieb legen. Projektpartner sind u.a. die Thyssenkrupp AG, Covestro, RWTH Aachen, Ruhr-Universität Bochum LEAT, Fraunhofer UMSICHT, Lhoist, Evonik, Remondis.

### Direkte Nutzung von Solarenergie als Basis für Kraftstoffe

Am Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-5) des FZ Jülich werden neuartige Materialien und photovoltaische Solarzellen im Rahmen des DFG-geförderten Projektes „SolarH<sub>2</sub>“ erforscht, die es erlauben, Wasserstoff direkt, also ohne Elektrolyseur, zu erzeugen. Der Wasserstoff kann dann entweder direkt als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen oder für Power-to-X-Prozesse eingesetzt werden.

Darüber hinaus ist z. B. das Institut für Photovoltaik des FZ Jülich an der Europäischen Großforschungsinitiative „SUNRISE“ beteiligt. Ziel des Forschungsprojektes ist die Bereitstellung einer Alternative zur fossilen, energieaufwendigen Produktion von Brennstoffen und Chemikalien basierend auf Solarenergie und allgemein verfügbaren Rohmaterialien (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>).

Seit 2020 bündelt das DLR seine Entwicklungen im Forschungsfeld synthetische Kraftstoffe im Institut für Future Fuels. Im Zentrum steht die Entwicklung technologischer Lösungen, die die kostengünstige Erzeugung von Brennstoffen im Sonnengürtel der Erde im großtechnischen Maßstab und ihren globalen Handel ermöglichen. Deshalb wird besonders zur Entwicklung von Materialien, Komponenten und Verfahren geforscht sowie zu deren Scale-up und techno- und sozioökonomischen Bewertung.<sup>27</sup> Zum Institut „Future Fuels“ gehören die Großanlagen Sonnenofen und Hochleistungsstrahler in Köln als auch die Forschungsanlage Synlight, die größte künstliche Sonne der Welt. Des Weiteren ist das DLR-Institut für Solarforschung im Rahmen der Forschungsinitiative „Energiewende im Verkehr“ am Forschungsprojekt „Solare Kraftstoffe für den Energiemix der Zukunft“ beteiligt. In diesem Kontext geht man der Frage nach, in welchem Maße die Herstellung und Nutzung von Kraftstoffen aus solarthermischen Herstellungsverfahren als Drop-in-Kraftstoffe Beiträge zu einer zügigen Reduzierung der fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Verkehr leisten können. Neben den bereits erwähnten Großanlagen haben die Institute u. a. auch Zugang zum Solarturm in Jülich. Hier werden neuartige Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff durch Hochtemperaturprozesse untersucht. Für die Energieversorgung von morgen erforschen Wissenschaftler des Instituts solarchemische Prozesse zur Speicherung von Solarenergie in solaren Brennstoffen. In der sogenannten solaren Verfahrenstechnik wird zum einen die Herstellung von Wasserstoff als auch die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in Brennstoffe ohne den Umweg über den Strom erforscht. Industriepartner sind u. a. die Luftfahrtindustrie und Motorenbauer, wie z. B. MAN Energy Solutions.

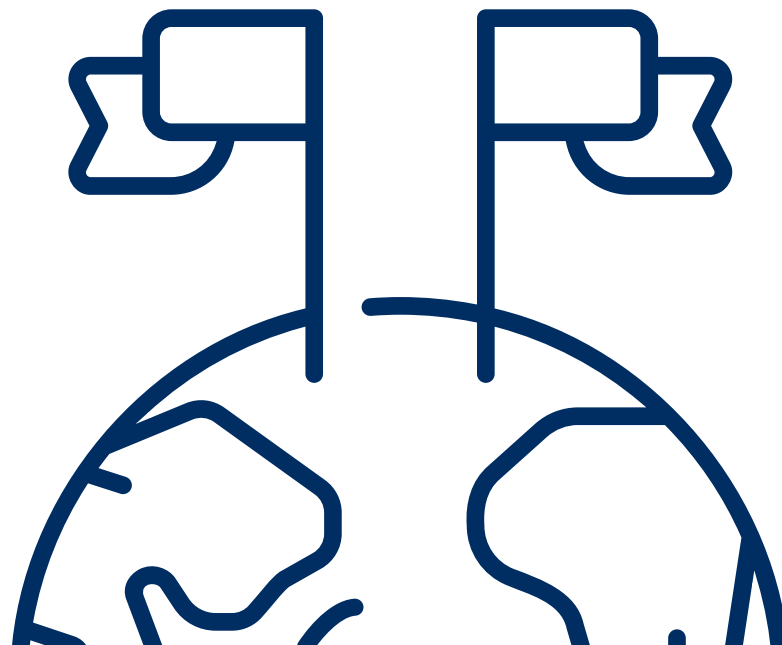
## 4.3 Forschung und Industrie – internationale Partnerschaften

Nordrhein-Westfalen hat – wie die Projekte zeigen – hervorragende Möglichkeiten, Technologien zu entwickeln und anzuwenden, verfügt aber nicht über ausreichend erneuerbare Ressourcen, um die notwendigen Mengen synthetischer Kraftstoffe ausschließlich heimisch zu erzeugen. Vielmehr ist es notwendig, Ressourcen zu importieren und Technologie zu exportieren, um eine starke Position im globalen Markt für synthetische Kraftstoffe einnehmen zu können.

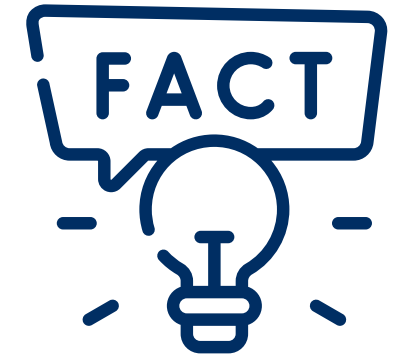
Um die innovativen Konzepte über die Landesgrenzen hinaus realisieren zu können und den globalen Markt weiter zu erschließen, sind Partnerschaften notwendig. In einer Reihe von Regionen gibt es bereits Entwicklungen, die sich dafür anbieten. Ein Beispiel ist das australische Heavy Industry Low-Carbon Transition Cooperative Research Centre (HILT CRC), das in den nächsten zehn Jahren den Strukturwandel in der australischen Schwerindustrie beschleunigen soll. Dabei spielen synthetische Kraftstoffe eine wichtige Rolle. Die Situation in Australien ist komplementär zu der in NRW. Erneuerbare Ressourcen sind nahezu unbegrenzt verfügbar, dazu eine starke Rohstoffindustrie, die langfristig innovative Technologien benötigt. Aus NRW ist das DLR als erster Partner am HILT CRC beteiligt, um seine Fachkompetenz und seine Transferkompetenz einzubringen. So eröffnet es weiteren Partnern aus Forschung und Industrie eine direkte Zugangsmöglichkeit zum HILT CRC und unterstützt die Wirtschaft, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu stärken und damit die Exportchancen für Technologie zu steigern.

Das Forschungszentrum Jülich wirkt im Rahmen des Projekts H<sub>2</sub>Atlas an der Erschließung von Wasserstoffpotenzialen in Afrika mit. H<sub>2</sub>Atlas ist Teil der „Go Green Go Africa“-Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und wird gemeinsam mit Partnern in der Subsahara-Region (SADC- und ECOWAS-Länder) durchgeführt. Gemeinsam werden die Potenziale für grünen Wasserstoff und dessen Folgeprodukte ermittelt. Das übergeordnete Ziel ist es, den Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft in den afrikanischen Regionen nachhaltig zu unterstützen. Profitieren können davon langfristig sowohl die Länder der Subsahara-Region als auch Deutschland.

Da es sowohl in der Industrie als auch in der Forschung in NRW bereits gute Verbindungen in viele dieser Länder und Regionen gibt, bietet es sich an, diese gerade für die Entwicklung und Markteinführung synthetischer Kraftstoffe zu stärken und so die internationalen Synergien für den Strukturwandel im gegenseitigen Interesse zu nutzen.



### Die Kernaussagen des Kapitels:



1

Die Forschung zu synthetischen Kraftstoffen ist in NRW hervorragend aufgestellt und Treiber der Innovationskraft nordrhein-westfälischer Unternehmen.

2

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Nordrhein-Westfalen sind der Schlüsselfaktor für die Positionierung nordrhein-westfälischer Unternehmen auf dem Weltmarkt für Klimaschutztechnologien.

3

Die Grundsatzfragen bei der Forschung zu synthetischen Kraftstoffen sind geklärt. Nun muss die Forschung den Weg von kleinen Pilotanlagen zu großtechnischen Anlagen begleiten und vorantreiben.

4

Internationale Forschungsk Kooperationen können dazu beitragen, nordrhein-westfälische Technologien auf dem Weltmarkt und bei internationalen Projekten zu platzieren.



## 05

40–59

## Synthetische Kraftstoffe – neue Wertschöpfungsketten



Nordrhein-Westfalen ist Raffinerie- und Chemiestandort. Für ein klimaneutrales Nordrhein-Westfalen im Jahr 2045 sind eine weitgehende Transformation der Industrie und das Erschließen zukunftsträchtiger Technologiepfade entscheidend.



Neue Mobilitätskonzepte werden die Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen reduzieren und Raffinerien vor Herausforderungen stellen. **Auf dem Weg in die Klimaneutralität gilt es deshalb, Wertschöpfungsketten anzupassen und neue Wertschöpfungspotenziale zu nutzen. Synthetische Kraftstoffe können hier – neben Wasserstoff – ein Baustein sein, um mit innovativen Lösungen Klimaschutz und Wettbewerbsfähigkeit in Nordrhein-Westfalen zu vereinen.** Nordrhein-Westfalen ist darüber hinaus ein europäischer Verkehrsknotenpunkt und damit direkt angebunden an künftige Abnehmer im Mobilitätssektor und der chemischen Industrie.

Der stärkste Kostentreiber bei der Produktion synthetischer Kraftstoffe sind die Kosten für erneuerbaren Strom bzw. für grünen Wasserstoff. Die Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen geht für das Jahr 2050 von einem Bedarf von insgesamt 139 TWh pro Jahr an synthetischen Kraftstoffen in NRW aus. Davon werden 129 TWh pro Jahr importiert und die heimische Produktion wird auf 10 TWh pro Jahr geschätzt. Die aktuelle dena-Leitstudie sieht für ganz Deutschland einen PtX/Powerfuel-Bedarf von über 650 TWh im Jahr 2045, wovon nur etwa 10 Prozent innerhalb Deutschlands produziert werden.<sup>28</sup>

Damit zeichnet sich ab, dass – genau wie bei Wasserstoff – Nordrhein-Westfalen auf Importe angewiesen sein wird und die Importquote bei rund 90 Prozent liegen wird. **Die künftigen Entwicklungen auf den internationalen Märkten und damit internationaler Partnerschaften sind daher für Nordrhein-Westfalen maßgeblich entscheidend.** Nordrhein-Westfalen wird aber in Zukunft nicht nur ein großer Abnehmer synthetischer Kraftstoffe sein, sondern kann seine Stärken im Maschinen- und Anlagenbau auf dem globalen Markt gewinnbringend einsetzen. Durch neue Herstellungspfade und angepasste Produktportfolios werden synthetische Kraftstoffe auch in Nordrhein-Westfalen produziert. Das Know-how aus Nordrhein-Westfalen kann beim Aufbau großskaliger Anlagen in Ländern mit geringen erneuerbaren Stromgestehungskosten eingebracht werden. **Im Zuge der klimaneutralen Transformation können in Nordrhein-Westfalen beispielhafte, komplexe PtX-Strukturen mit internationalem Vorbildcharakter aufgebaut werden.** Durch die enge Verzahnung der chemischen Industrie, der Raffinerien und des Verkehrssektors entwickelt sich Nordrhein-Westfalen zu einem innovativen Wertschöpfungsnetzwerk.

## 5.1 Nordrhein-Westfalen als Produktionsstandort synthetischer Kraftstoffe

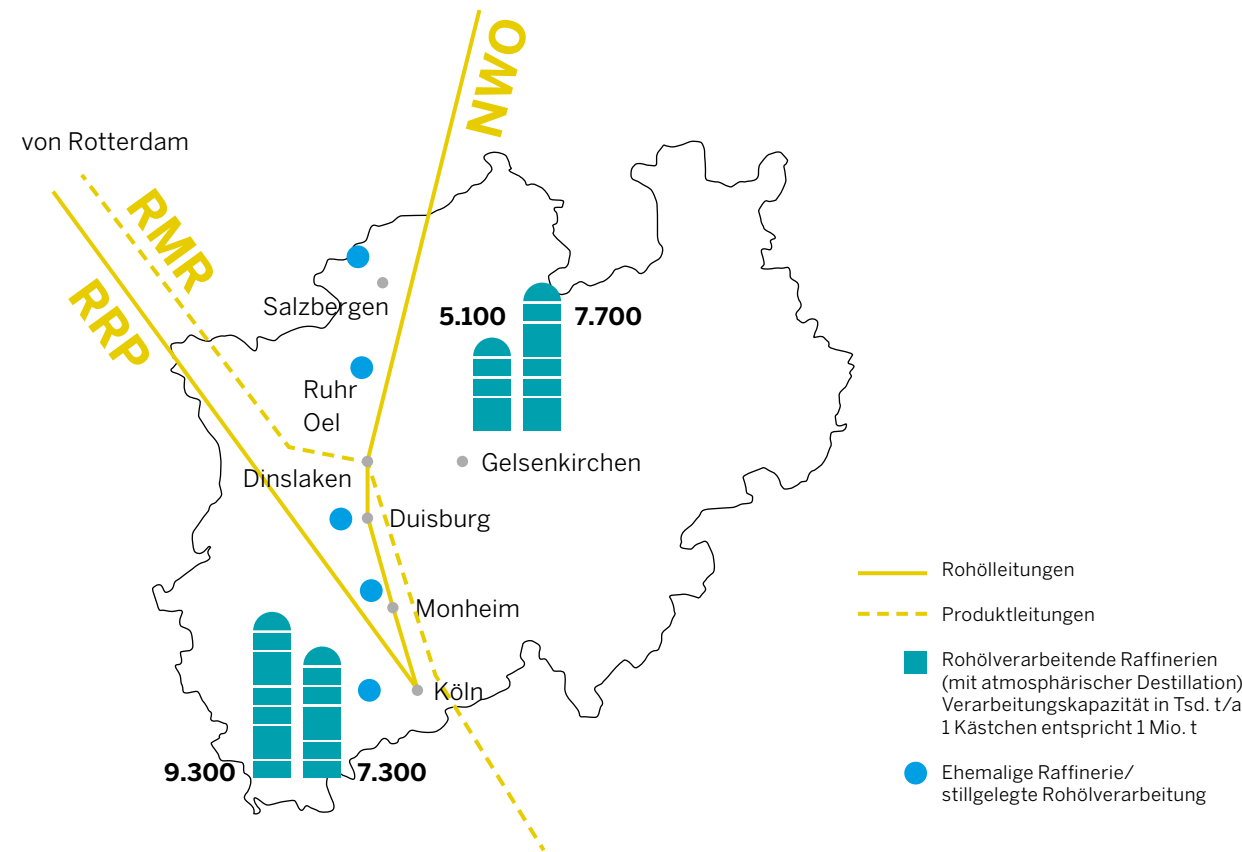
### 5.1.1 Wertschöpfungsketten in NRW heute

In Nordrhein-Westfalen befinden sich vier Raffinerien in zwei Städten: zwei BP-Werke in Gelsenkirchen-Scholven und -Horst und zwei Shell-Werke in Köln-Godorf und -Wesseling. Die beiden BP-Raffinerien haben eine Rohölverarbeitungskapazität von 12,8 Mio. Tonnen pro Jahr und die beiden Shell-Raffinerien von rund 16,6 Mio. Tonnen pro Jahr.

Nordrhein-westfälische Raffinerien haben damit einen Anteil von knapp 30 Prozent an den gesamtdeutschen Kapazitäten. Die Kölner Raffinerien sind über die Rotterdam-Rhein-Pipeline (RRP) an den Ölhafen in Rotterdam angeschlossen. Das Wesseling-Werk ist zusätzlich über die Nord-West-Oelleitung (NWO) auch mit dem Tiefseehafen Wilhelmshaven verbunden. Die Raffinerie von BP in Gelsenkirchen ist sowohl an die NWO als auch an die RRP angeschlossen.<sup>29</sup>



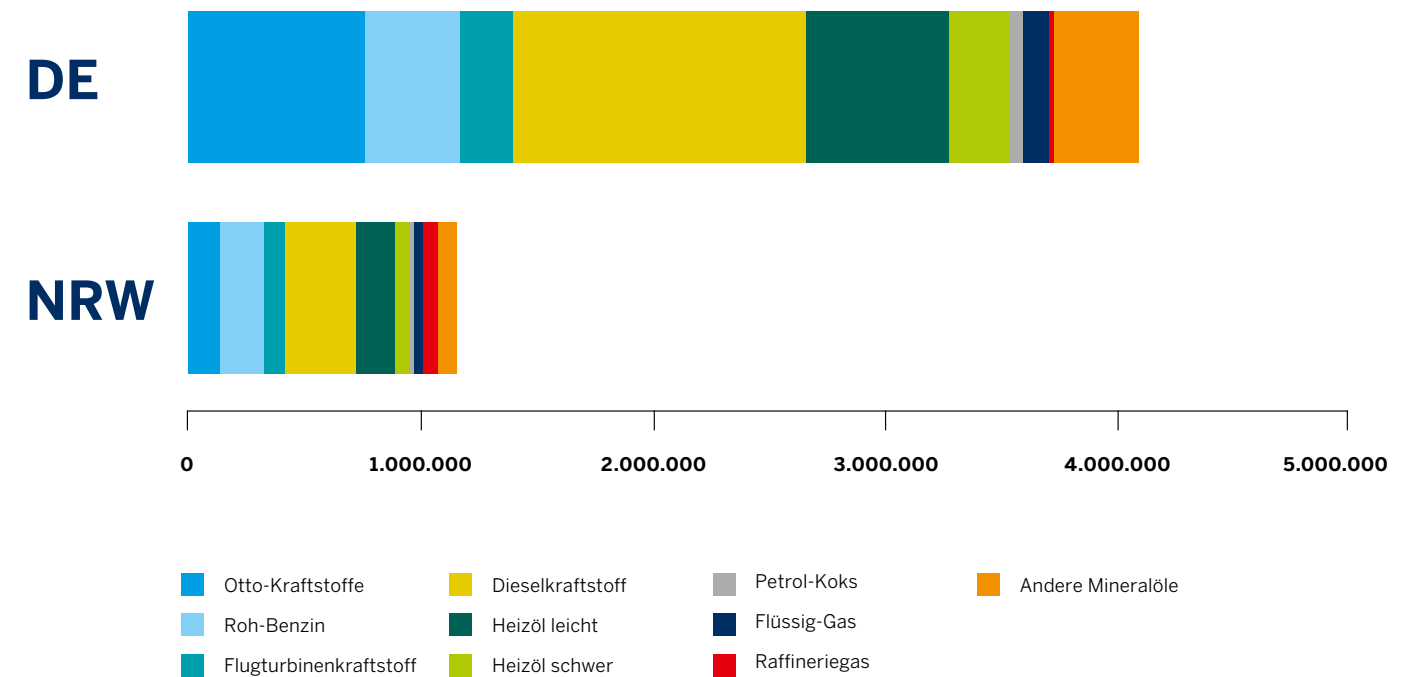
Abbildung 10: Raffineriestandorte und Pipelines in NRW<sup>30</sup>



Diesel- und Ottokraftstoffe machten im Jahr 2016 knapp die Hälfte der deutschen Raffinerieproduktion aus. Diesel hat mit knapp einem Drittel den größten Anteil. Dies gilt mit einem Anteil von 27 Prozent auch für die Raffinerien in NRW, allerdings kommen die Kraftstoffe zusammen nur auf 39 Prozent. Der drittgrößte Produktionsposten ist jeweils Rohbenzin (oder auch Naphtha), der in NRW 16 Prozent beträgt. Damit hat Naphtha in NRW einen wesentlich höheren Anteil als in anderen Bundesländern. Dabei handelt es sich um ein relativ leichtes Erdöldestillat.

Es dient als Rohstoff für den Einsatz in der Petrochemie für die Produktion von Benzinkraftstoffen und Flugtreibstoffen, von BTEX sowie der Gewinnung von Ethylen und Propylen. Ethylen und Propylen werden jeweils als Ausgangsstoffe für die Produktion von Kunststoffen wie Polyethylen und Polypropylen verwendet.<sup>31</sup> Die Produktion von Naphtha ist neben der von anderen Mineralölprodukten von Vorteil für die Kopplung der Raffinerien mit der chemischen Industrie und damit künftig auch für den Aufbau von Feedstock-Raffinerien in NRW.

Abbildung 11: Aufkommen von Mineralölprodukten in den Raffinerien von Deutschland (DE) und NRW<sup>32</sup>



NRW hat – gemessen an der gesamtdeutschen Produktion – einen Anteil von 46 Prozent an der Naphtha-Produktion. NRW hat außerdem große Anteile (ca. 40 Prozent) an der Kerosinproduktion. Da davon ausgegangen wird, dass es für Langstrecken keine Elektrifizierungsoption gibt, kann die Ausrichtung auf Kerosinproduktion auch künftig vorteilhaft für die NRW-Raffineriestandorte sein.<sup>33</sup>

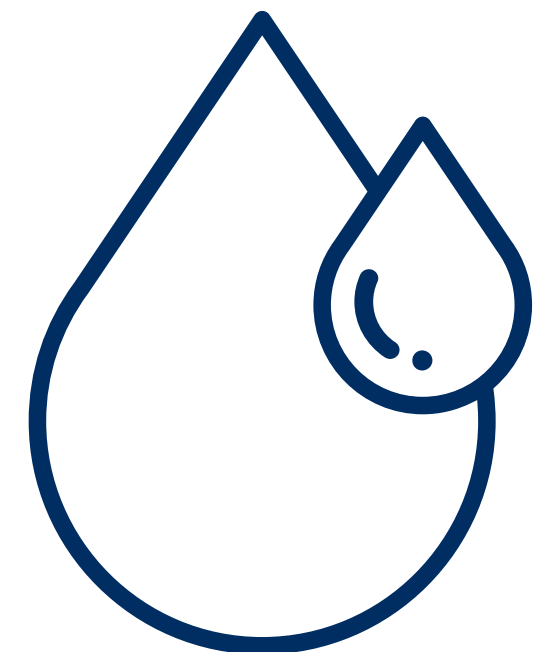
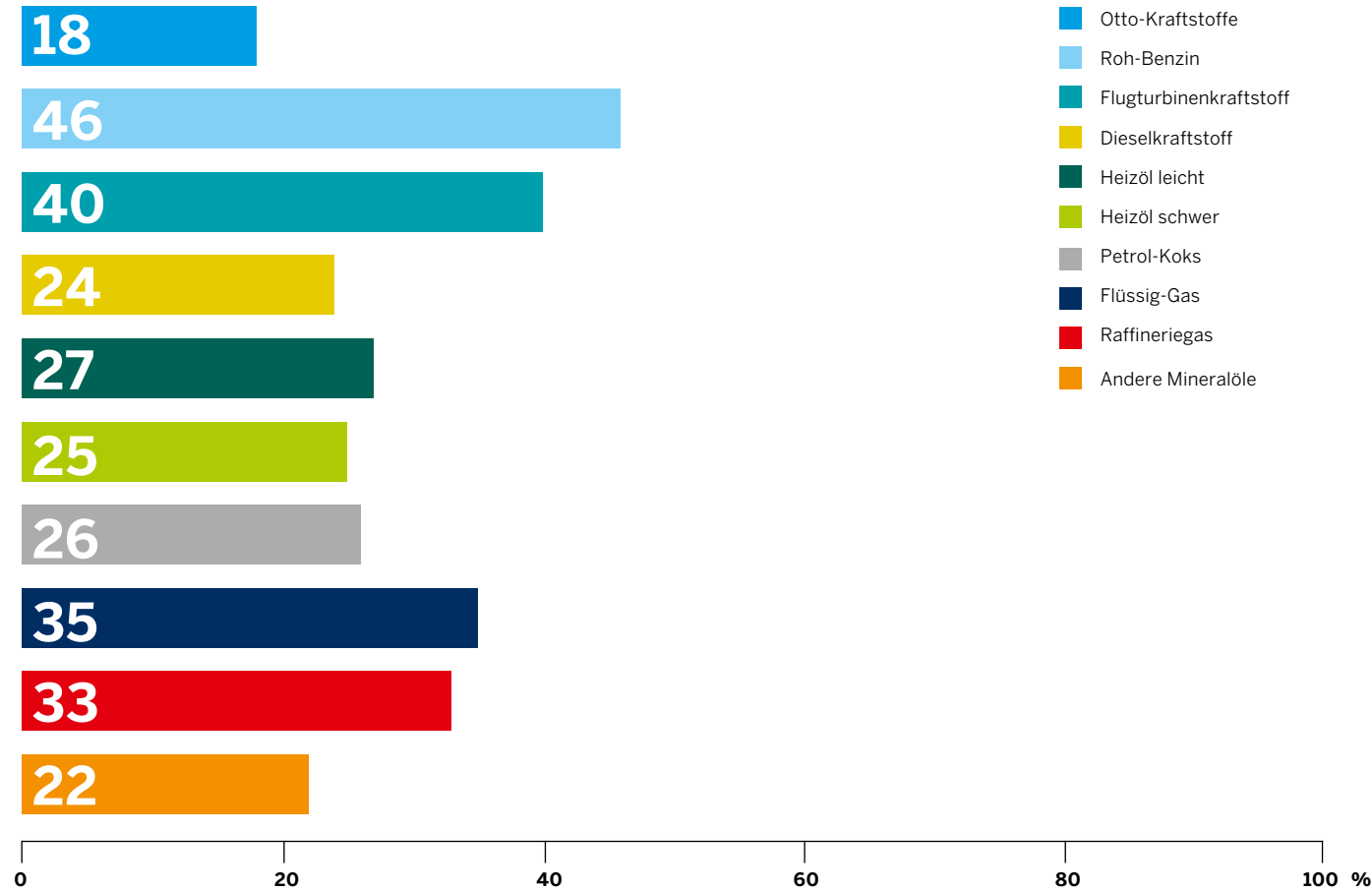


Abbildung 12: Anteil der NRW-Raffinerien an deutschen Produktionsmengen im Jahr 2016<sup>34</sup>



### 5.1.2 NRW als klimaneutraler Raffineriestandort der Zukunft

Raffinerien in einer klimaneutralen Wirtschaft werden nicht nur die Anpassung an neue Technologiepfade meistern müssen, sondern zusätzlich ihr Angebot an die sich künftig stark veränderte Nachfrage anpassen müssen. Beides ist möglich und kann auf verschiedene Arten gestaltet werden. **In jedem Fall können Anlagenumrüstungen und der Aufbau von Syntheserouten nur mit rechtzeitigen, großen Investitionen** mit langen Vorlaufzeiten gelingen. Nordrhein-Westfalen wird hier Modellstandort und zeigt, wie Transformation gestaltet werden kann.

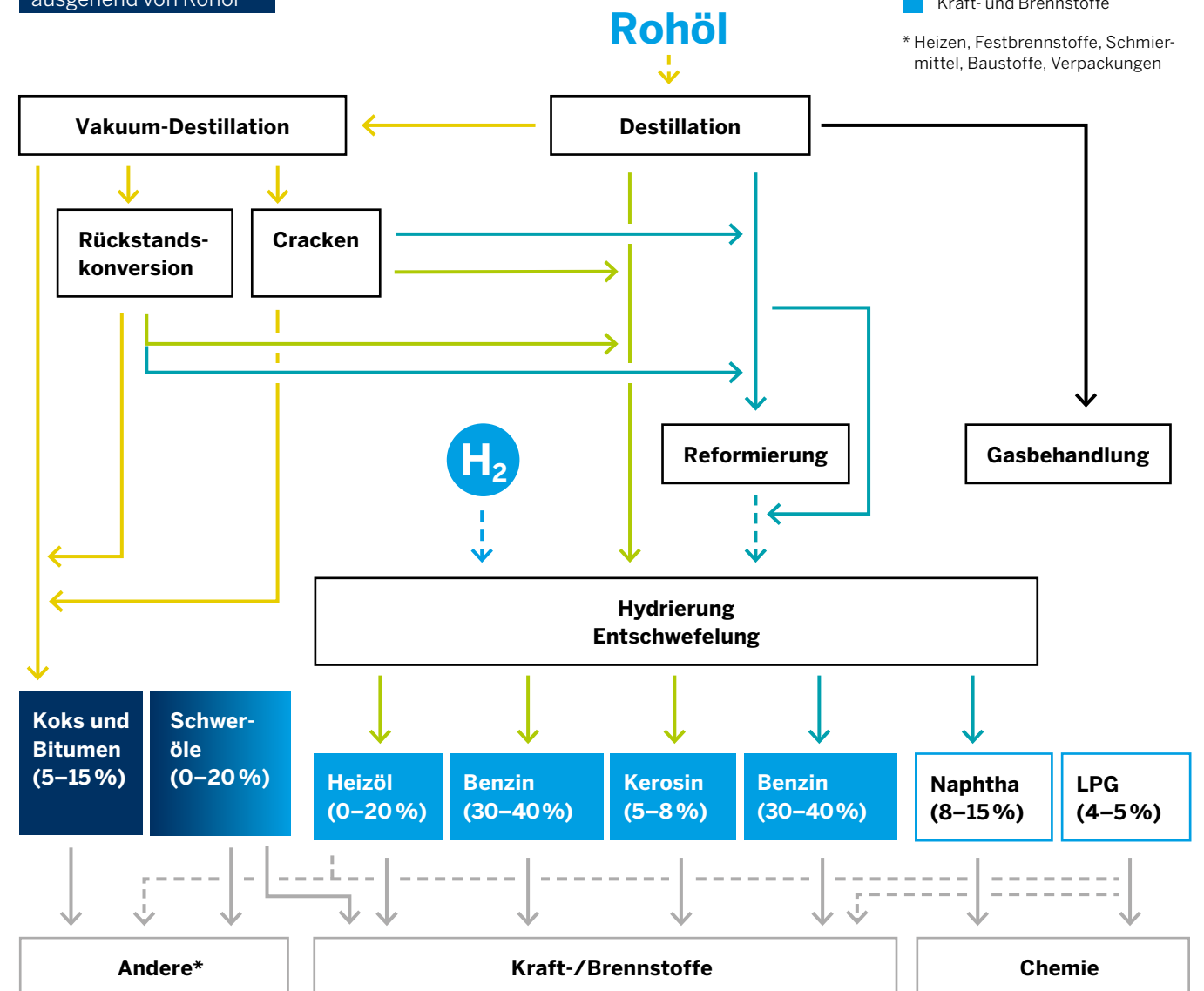
Der Kölner Standort, betrieben von Shell, plant die Transformation von einer klassischen, erdölbasierten Raffinerie zu einem Energy and Chemicals Park

Rheinland. Dieser soll langfristig CO<sub>2</sub>-arme und CO<sub>2</sub>-freie Produkte anbieten und sich damit zu einem Produktionsstandort mit beinahe null CO<sub>2</sub>-Emissionen entwickeln. Der Rohöleinsatz soll signifikant reduziert und fossile Einsatzstoffe nur noch zu Produkten verarbeitet werden, die nicht verbrannt werden, z. B. Basisprodukte für die chemische Industrie, Schmierstoffe und Bitumen. Ein weiterer Schwerpunkt wird die Herstellung synthetischer Kraftstoffe mittels Bio-PtL-Verfahren zu Flugkraftstoffen. Am Anfang steht die Synthese eines Pyrolyseöles, das anschließend in mehreren Schritten zusammen mit grünem Wasserstoff in einer Fischer-Tropsch-Synthese weiterverarbeitet wird. Als Kohlenstoffquelle werden beispielsweise industrielle Holzreste verwertet. Ein wichtiger Baustein für die neuen Produktionspläne ist der Umbau der Produktionsanlagen. **Ziel ist der Bau einer Anlage, die eine Kapazität von rund 100.000 Tonnen PtL-Produkten pro Jahr haben soll. Der Fischer-Tropsch-Prozess könnte so angepasst werden, dass 80 Prozent des Produktes als Flugkraftstoff eingesetzt werden können.**

Diese Anlage würde bei der Produktion von Flugkraftstoffen sowie von Naphtha die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zu herkömmlichen Produkten um über 80 Prozent reduzieren. Ein weiterer wichtiger Baustein ist neben der Bio-PtL-Anlage die Erhöhung der Elektrolysekapazität der Proton Exchange Membrane (PEM)-Wasserstoff-Elektrolyseanlage REFHYNE von derzeit 10 MW auf 100 MW. Ein Teil des für den Fischer-Tropsch-Prozess benötigten grünen Wasserstoffs kann also direkt vor Ort produziert werden. **Die Wertschöpfungsketten bei Flugkraftstoffen und chemischen Produkten können im Wesentlichen erhalten bleiben.** Anders sieht es bei Diesel, Benzin und Heizöl aus, da hier ein deutlicher Nachfragerückgang erwartet wird. Die genaue Anpassung der Wertschöpfungsketten – und damit des Produktportfolios – wird kontinuierlich an die Nachfrageentwicklung erfolgen.

Auch am Standort in Gelsenkirchen, betrieben von BP, steht neben der Petrochemie und der Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks konventioneller Kraftstoffe langfristig vor allem der Flugverkehr im Fokus. Im Rahmen des Gemeinschaftsprojekts GET H<sub>2</sub> Nukleus soll grüner Wasserstoff im niedersächsischen Lingen an einem bestehenden Kraftwerksstandort der RWE-Generation zunächst in einer 100-MW-Elektrolyseanlage mithilfe von erneuerbarem Strom erzeugt werden. Größtenteils über bestehende Gasleitungen soll der Wasserstoff dann nach Gelsenkirchen transportiert werden. Ein Ausbau auf 300 MW bis 2026 ist vorgesehen. Hinsichtlich möglicher synthetischer Kraftstoffe liegt der Fokus auf synthetischem Kerosin. Mit den Flughäfen Köln und Düsseldorf und einer Reihe weiterer Flughäfen ist Nordrhein-Westfalen sehr gut positioniert für den künftigen Vertrieb synthetischer Kraftstoffe.

Abbildung 13: Wertschöpfungsketten ausgehend von Rohöl<sup>35</sup>





### 5.1.3 Synthetische Kraftstoffe in der chemischen Industrie

Nordrhein-Westfalen ist mit 13 Chemieparcs der bedeutendste Chemiestandort in Deutschland und erwirtschaftet rund ein Drittel aller Umsätze in der chemischen Industrie.<sup>36</sup> Der chemischen Industrie kommt bei der Gestaltung neuer Wertschöpfungsketten eine besondere Rolle zu, da sie Anknüpfungspunkte zu vielen weiteren Branchen hat. In der chemischen Industrie können neben Wasserstoff vor allem Methanol und einzelne Fraktionen der Fischer-Tropsch-Synthese als Rohstoff eingesetzt werden. Auch die nordrhein-westfälische Chemieindustrie steht angesichts der Klimaziele vor großen Veränderungsprozessen.

Ein Beispiel findet sich in der chemischen Industrie am Standort Köln. Die INEOS plant den Bau eines Elektrolyseurs, um zunächst den grauen Wasserstoff für die Ammoniaksynthese teilweise durch grünen Wasserstoff zu ersetzen. Im zweiten Schritt soll die Elektrolysekapazität auf 105 MW erhöht werden und zusätzlich eine Methanol-Synthese errichtet werden. Ein Teil des Wasserstoffs wird in die Methanol-Synthese gehen, der Rest nachfrageabhängig als Kraftstoff in den Mobilitätssektor.

Eine Produktion von 15 bis 20 Kilotonnen Methanol pro Jahr wäre hier möglich. Perspektivisch können weitere chemische Derivate wie synthetisches Naphtha und nach der weiteren Verarbeitung synthetische Otto- und Dieselmotorkraftstoffe oder Kerosin produziert werden.

Der Einsatz von grünem Methanol bzw. Naphtha ist ein zentraler Baustein bei der Umstellung auf klimaneutrale Produktionsprozesse. **Frühe Investitionsentscheidungen sind notwendig, auch wenn die neuen Technologien zu diesem Zeitpunkt noch nicht wirtschaftlich sind.** Um die Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen zu erhalten, sind politische Reformen insbesondere auch mit Blick auf das Steuer-, Abgaben- und Umlagensystem notwendig.

Die Industrie befindet sich bereits in einem umfassenden Transformationsprozess. Die Nachfrage wird sich verändern und synthetische Kraftstoffe Teil des künftigen Produktportfolios sein. Nordrhein-Westfalen kann künftig Standort für Pilot- und Demonstrationsanlagen werden. Raffinerien werden spezialisierte Märkte mit Fokus auf synthetischem Kerosin und Grundstoffen für die chemische Industrie bedienen. Im Zuge der Transformation werden in Nordrhein-Westfalen beispielhafte komplexe PtX-Strukturen mit einem internationalen Vorbildcharakter aufgebaut.



## 5.2 Internationale Märkte

Nordrhein-Westfalen wird trotz eigener Produktionskapazitäten im großen Maßstab synthetische Kraftstoffe importieren müssen und die internationalen Marktentwicklungen werden deshalb besonders relevant. Synthetische Kraftstoffe werden absehbar ein auf dem Weltmarkt gehandeltes Produkt sein, ähnlich wie derzeit Erdöl auf dem internationalen Ölmarkt. In diesem Markt wird derzeit das Rohprodukt Erdöl mit Öltankern und durch Pipelines in die Nachfrageländer transportiert und dort in Raffinerien zu den benötigten Kraftstoffen (vor allem Benzin, Diesel, Kerosin und Heizöl) weiterverarbeitet. Der Handel erfolgt entweder über langfristige Bezugsverträge oder über das freie Spiel von Angebot und Nachfrage.

Da synthetische Kraftstoffe sowohl in bestehenden Öltankern und -pipelines transportiert werden können, werden auch die derzeitigen Parameter des Ölmarktes maßgebend für einen internationalen Markt für synthetische Kraftstoffe sein. Allerdings kann es Verlagerungen von Raffinerien in die Produktionsländer kommen, da es technisch möglich ist, in der Herstellung synthetische Kraftstoffe in den kompletten Raffinerieprozess zu integrieren.

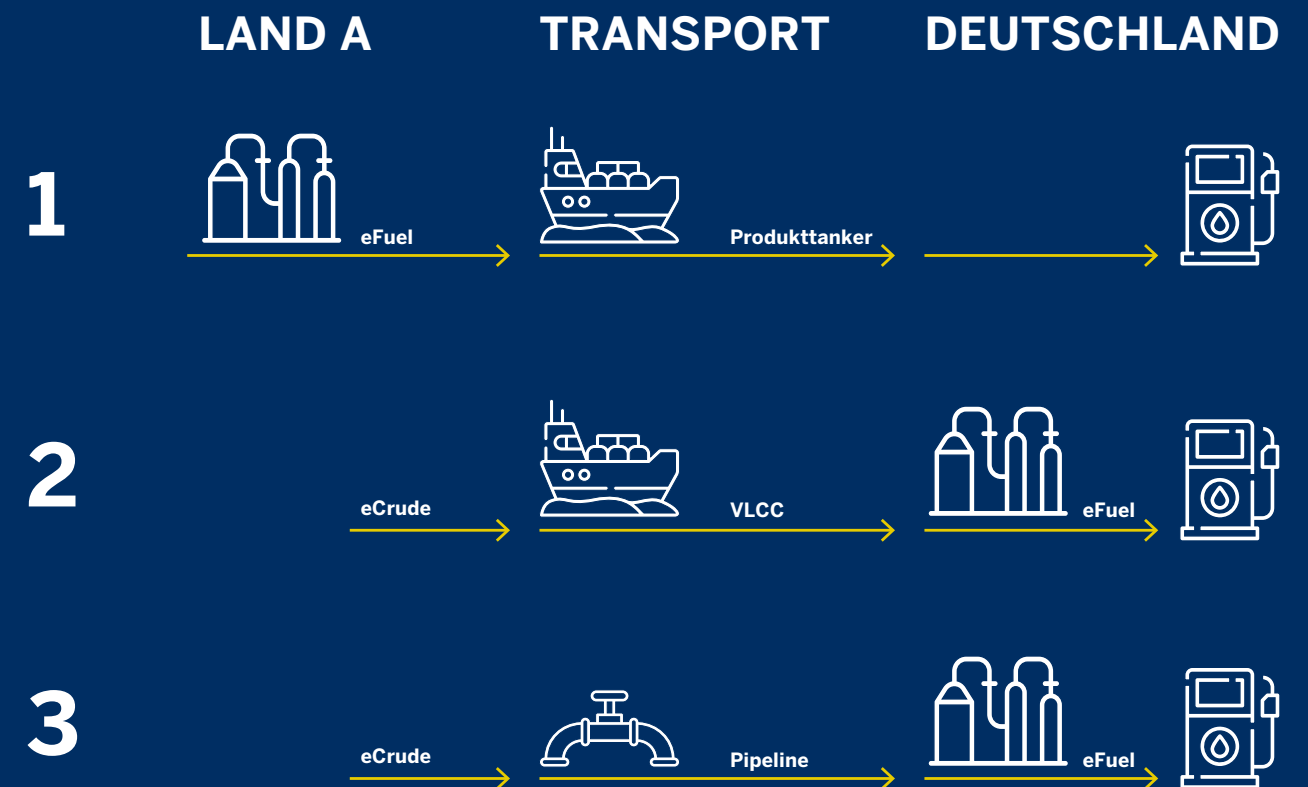
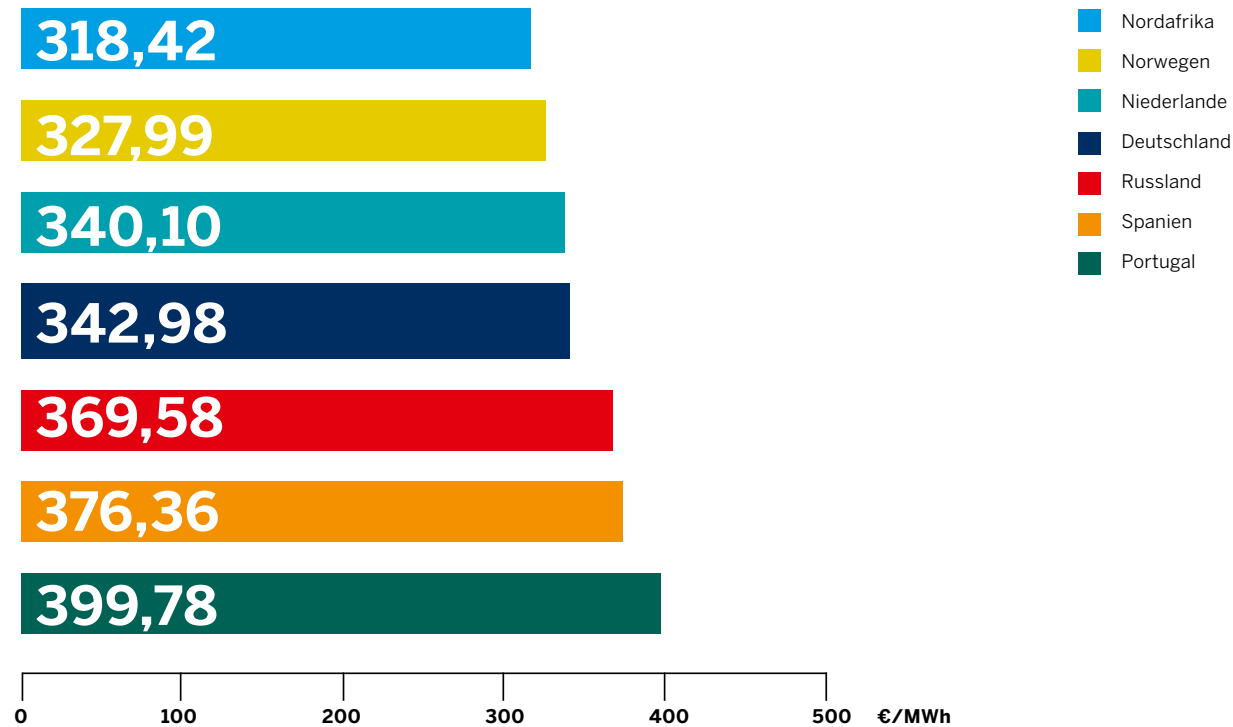


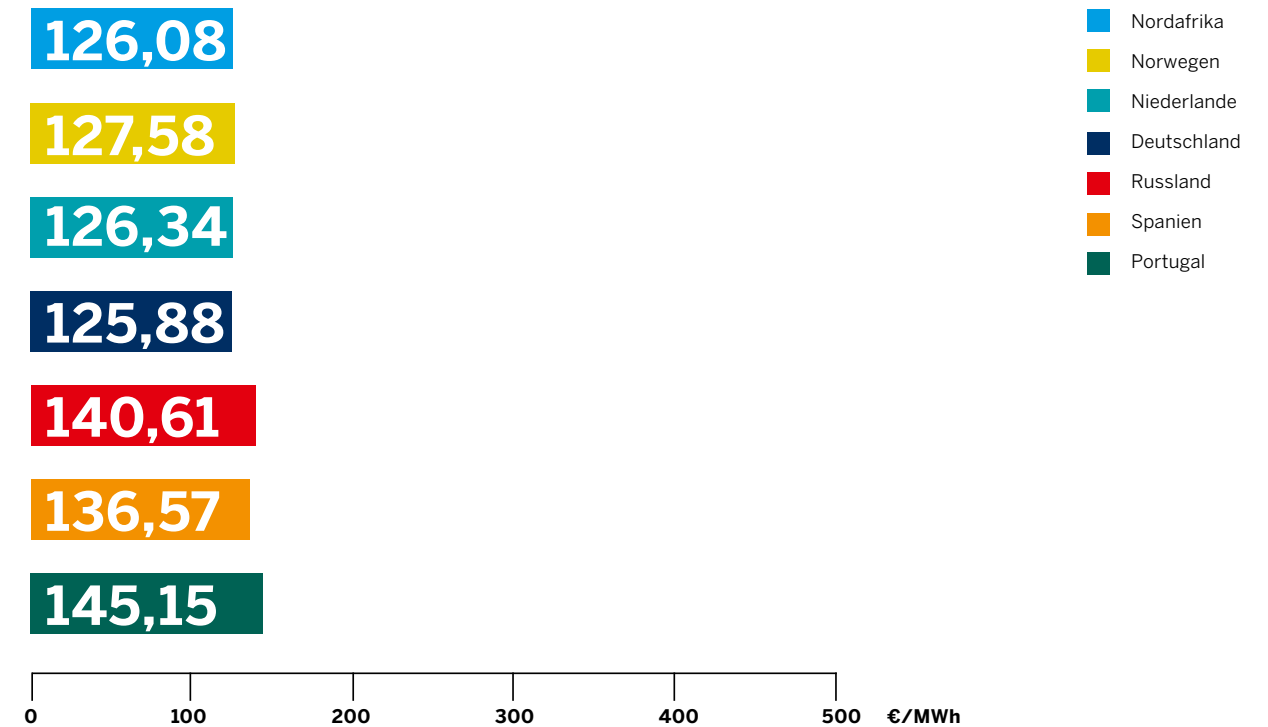
Abbildung 14: Vergleich der Länder nach günstigster Aufkommens- und Transportquelle 2021



Im Rahmen einer Marktmodellierung wurden die Herstellungs- und Transportkosten synthetischer Kraftstoffe in verschiedenen Regionen und einzelnen Ländern untersucht. Die Abbildungen 14 und 15 zeigen die heutigen und künftigen Preisentwicklungen im Vergleich. Betrachtet wurden die Region Nordafrika (berücksichtigt wurden hier die Länder Marokko, Algerien und Tunesien), Norwegen, das Nachbarland Niederlande, Deutschland selbst, Russland und die beiden südeuropäischen Länder Spanien und Portugal. Dabei handelt es sich um eine Auswahl an potenziellen Importländern, ist aber nicht abschließend. Ziel ist vielmehr, eine Einschätzung über die voraussichtliche Marktentwicklung in Ländern mit unterschiedlichen Voraussetzungen treffen zu können. Der Preis für synthetische Kraftstoffe hängt im Wesentlichen vom Wasserstoffpreis, vom Wirkungsgrad der Umwandlungsanlage und den Kosten für das genutzte CO<sub>2</sub> ab. Auch die Kapitalkosten haben einen spürbaren Einfluss auf den Preis.

Die Transportkosten sind beim Schiffstransport deutlich günstiger als über den Pipelinepfad, machen bei beiden Optionen aufgrund der bereits bestehenden Infrastruktur dagegen aber nur einen marginalen Anteil aus. Derzeit hätten in diesem Markt synthetische Kraftstoffe aus Nordafrika einen Wettbewerbsvorteil vor nord- und mitteleuropäischen Ländern. Mit rund 320 Euro/MWh kann es etwas günstiger als das gleiche Produkt aus Norwegen, den Niederlanden, Deutschland oder Russland angeboten werden (ca. 330 bis 350 Euro/MWh). Am teuersten wären synthetische Kraftstoffe aus Spanien und Portugal mit 360 bis 400 Euro/MWh. Der genutzte Wasserstoff würde am günstigsten aus Wind-Onshore-Strom produziert werden können. **Diese Wettbewerbsvorteile gleichen sich aber bis 2050 immer mehr an und pendeln sich bei einem durchschnittlichen Preis von 125 Euro/MWh ein, sodass von einem Markt mit weitgehender Chancengleichheit zwischen den Produktionsländern ausgegangen werden kann.**

Abbildung 15: Vergleich der Länder nach günstigster Aufkommens- und Transportquelle 2050



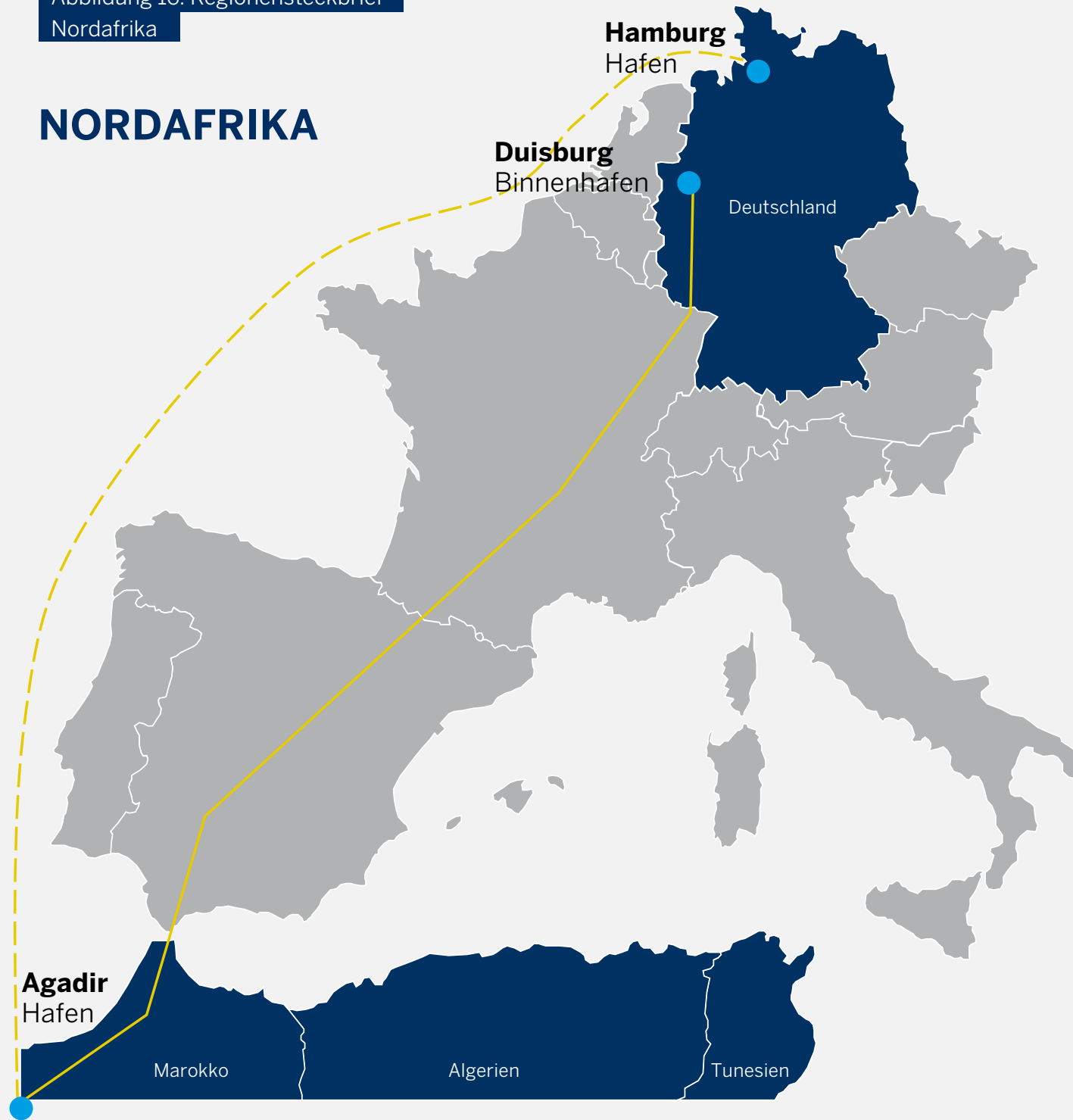
Auch wenn bei der Preisentwicklung durch Skaleneffekte sowohl die Wasserstoffkosten als auch die CO<sub>2</sub>-Kosten bis 2050 deutlich sinken werden, belaufen sich die Kosten für synthetische Kraftstoffe zu Beginn in allen untersuchten Ländern auf einen Betrag, der die derzeitigen Erdölprodukte bis zu zehnfach übersteigt und damit weitab von einer Wettbewerbsfähigkeit gegenüber dem jetzigen Ölmarkt liegt. Somit wird sich der beschriebene internationale Markt für synthetische Kraftstoffe nur entwickeln, wenn synthetische Kraftstoffe zunächst politisch flankiert werden.

Neben der Preisfrage spielt auch die derzeitige Einbettung der potenziellen Bezugsländer in den Ölhandel mit Deutschland eine wichtige Rolle. Deutschland importierte zuletzt einen Rohölbedarf von 84,8 Mio. Tonnen (2018). Der größte Teil davon kommt per Pipeline aus Russland (31 Mio. Tonnen Erdöl (2018)). Das Land liegt preislich zwar nur im Mittelfeld eines Marktes für synthetische Kraftstoffe, kann aber auf bestehende Infrastrukturen aufbauen. Spanien und Portugal, die schon aufgrund ihrer Mitglied-

schaft im EU-Binnenmarkt potenziell interessante Importländer wären, können auf eine solch bestehende Pipeline-Infrastruktur nicht zurückgreifen. Es gibt bisher keine Ölpipeline über die Pyrenäen nach Frankreich, sodass ein möglicher Handel mit diesen Ländern über den Seeweg stattfinden müsste. Die nordafrikanischen Länder wiederum haben anfangs zwar den finanziellen Wettbewerbsvorteil, allerdings liefern aus dieser Region bisher nur Algerien (etwa 700.000 Tonnen Rohöl (2018)) und Libyen (etwa 7 Mio. Tonnen Rohöl (2018)) nach Deutschland. Auch hier besteht bisher keine Öl-Pipeline in die EU.<sup>37</sup> Produktionskapazitäten und Importinfrastrukturen müssen neu aufgebaut werden. Beim Vergleich fällt auf, dass der Bezug aus Norwegen kostenseitig schon heute vergleichsweise nah an der Region Nordafrika liegt. Bis zum Jahr 2050 werden die nordafrikanischen Länder, Deutschland, die Niederlande und Norwegen beinahe gleichauf liegen. Eine einseitige Festlegung auf Importländer erscheint vor diesem Hintergrund nicht sinnvoll, sondern lässt den Schluss zu, dass die Importlandschaft künftig divers ausgestaltet sein wird.

Abbildung 16: Regionensteckbrief Nordafrika

# NORDAFRIKA



## VERFÜGBARKEIT

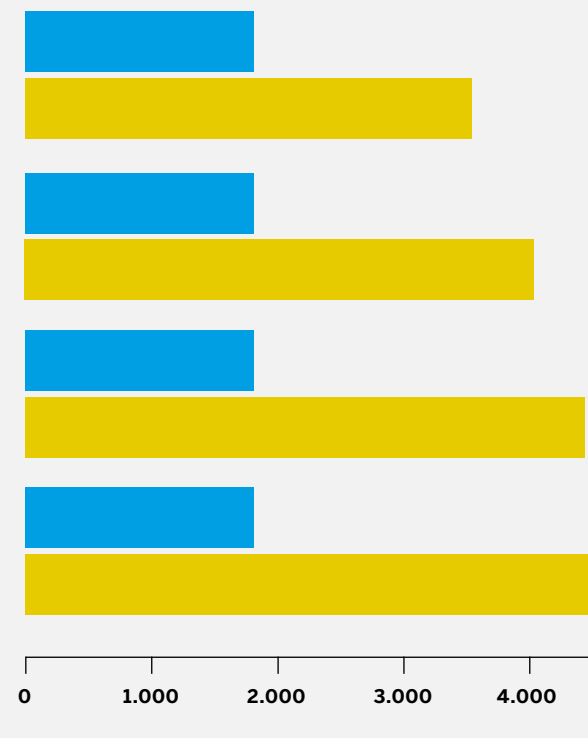
- Stromversorgung EE 2019: Marokko 18%, Algerien 1%, Tunesien 3%\*
- Rohölimport Deutschland 2017: 160 Tsd. t (Tunesien)\*\*
- Marokko: Grüne Wasserstoffpilotanlage soll ab 2025 rund 10.000 t/a H<sub>2</sub> produzieren.
- Weighted Average Cost of Capital (WACC)\*\*\*: 11%

## TRANSPORT

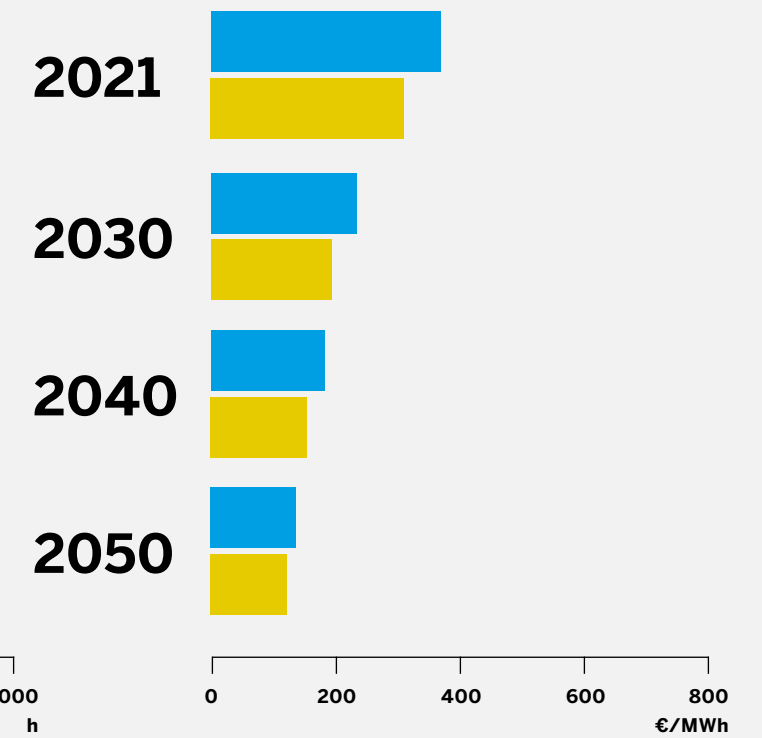
- Pipeline nach Duisburg (2.900 km)
- Schiff vom Agadir Hafen zum Hamburger Hafen (3.400 km)
- Produktanker: 0,36 €/MWh<sub>eFuel</sub>; Pipeline: 0,68 €/MWh<sub>eCrude</sub>

\* IEA (2021) World Energy Balances 2020. \*\* MWV (2020) Jahresbericht 2020. \*\*\* Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten einer Unternehmung.

## VOLLLASTSTUNDEN



## PtL-GESTEHUNGSKOSTEN



■ PV  
■ Wind Onshore

## INKLUSIVE TRANSPORT

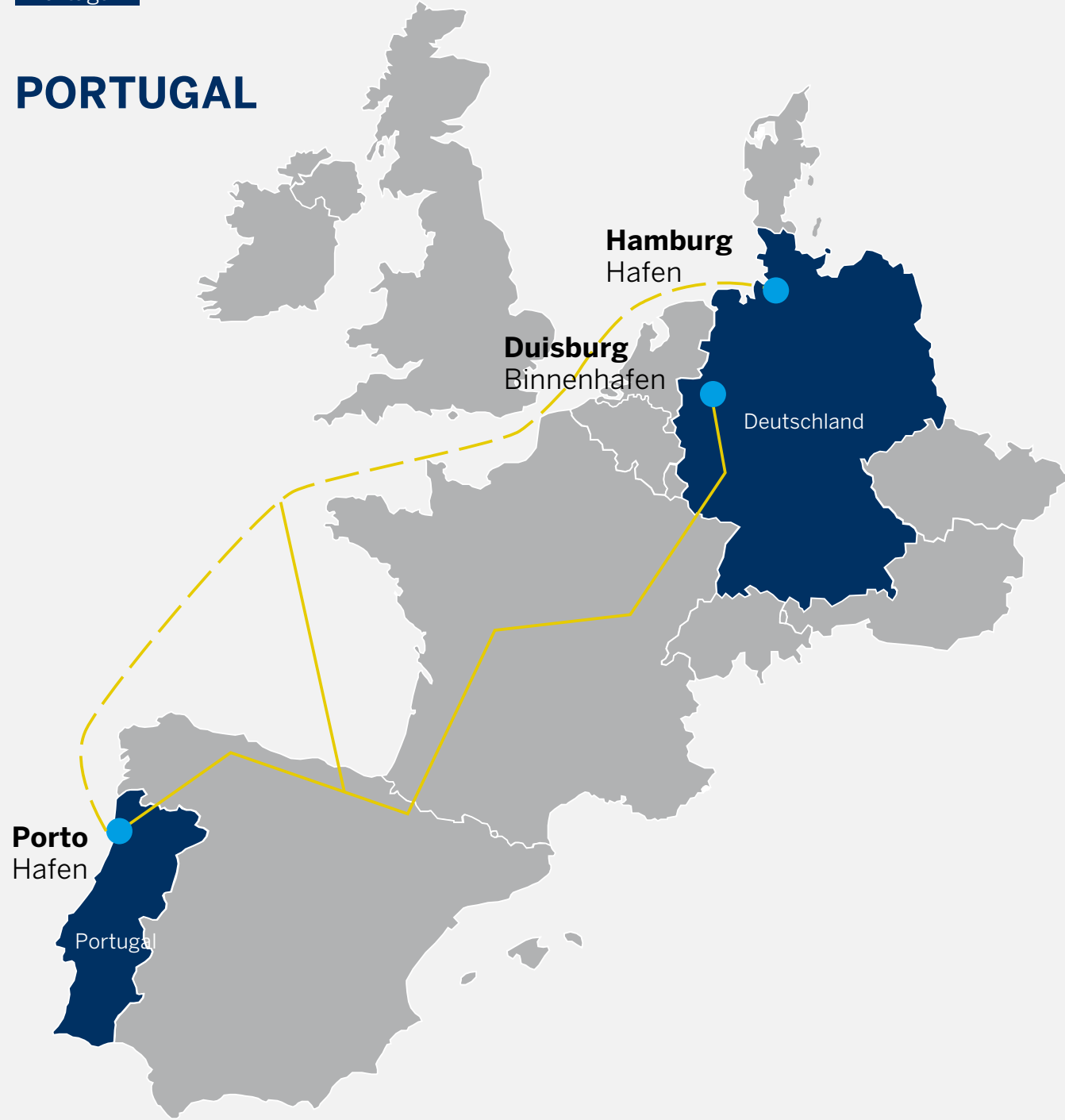
€/MWH	PV	WIND ONSHORE	WIND OFFSHORE
<b>2021</b>	377,7	318,4	/
<b>2030</b>	240,2	199,3	/
<b>2050</b>	140,7	126,1	/





Abbildung 17: Ländersteckbrief Portugal

# PORTUGAL



## VERFÜGBARKEIT

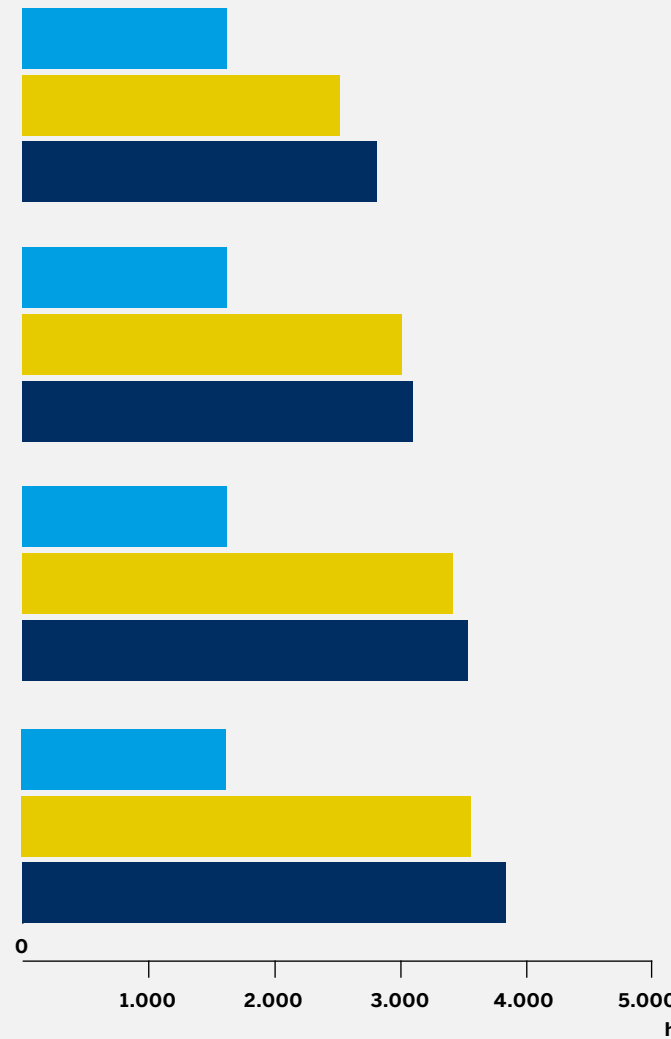
- Stromversorgung EE 2019: 47%\*
- Rohölimport Deutschland 2018: 0\*\*
- Produktion von grünem Wasserstoff ab 2022 geplant
- Weighted Average Cost of Capital (WACC)\*\*\*: PV 9%; Wind (On- und Offshore) 9,5%

## TRANSPORT

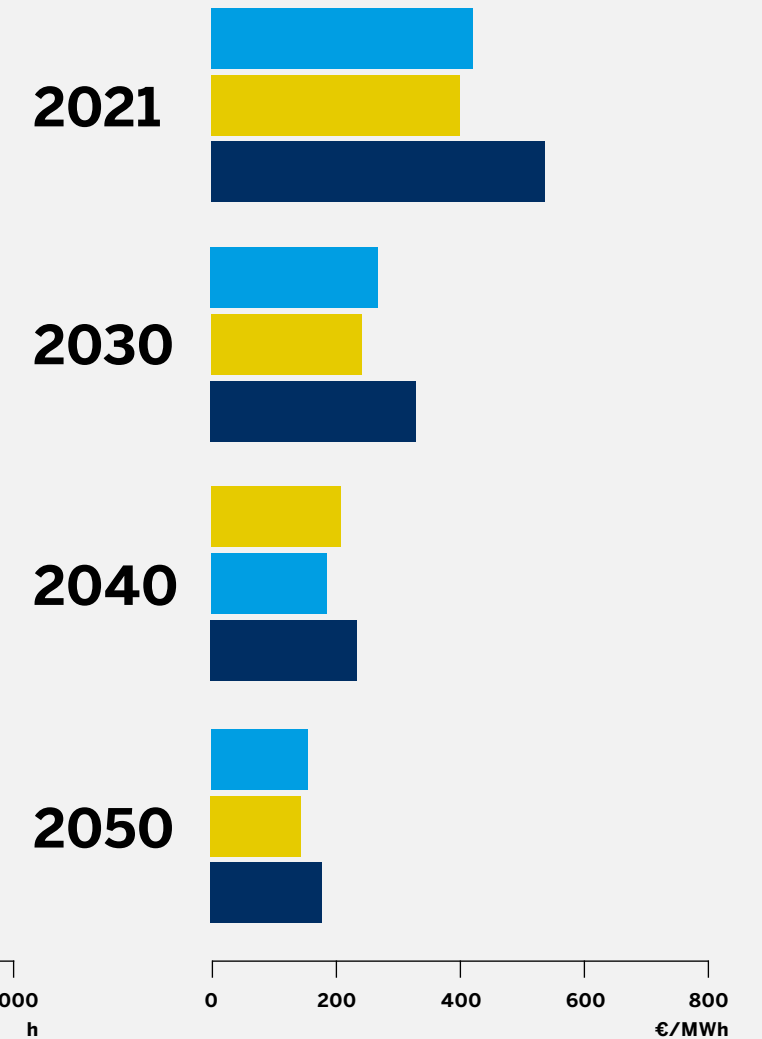
- Pipeline nach Duisburg (2.130 km)
- Schiff vom Porto Hafen zum Hamburger Hafen (2.400 km)
- Produktanker: 0,25 €/MWh<sub>eFuel</sub>; Pipeline: 0,56 €/MWh<sub>eCrude</sub>

\* IEA (2021) World Energy Balances 2020. \*\* MWV (2020) Jahresbericht 2020. \*\*\* Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten einer Unternehmung.

## VOLLASTSTUNDEN



## PtL-GESTEHUNGSKOSTEN



- PV
- Wind Onshore
- Wind Offshore

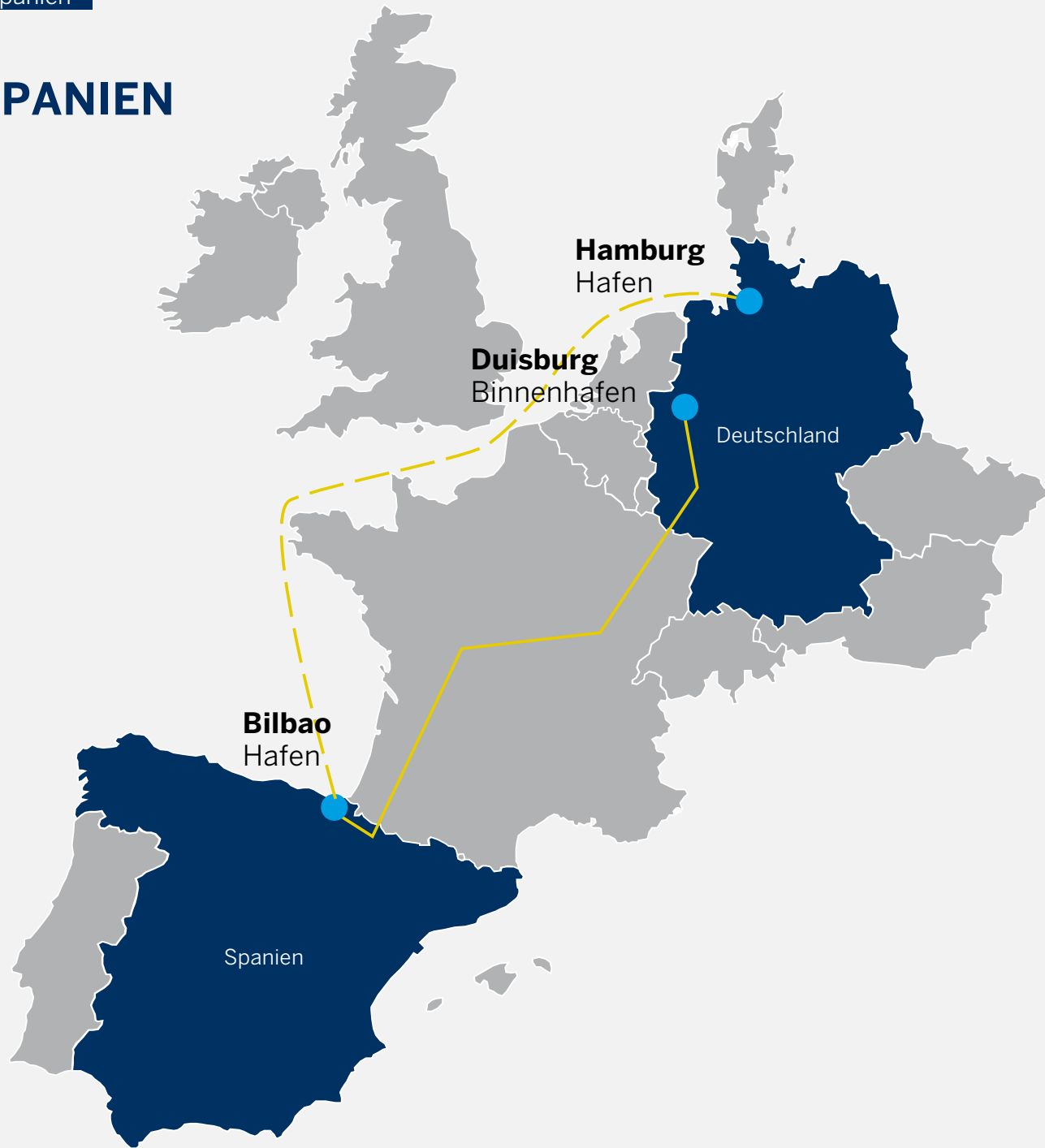
## INKLUSIVE TRANSPORT

€/MWH	PV	WIND ONSHORE	WIND OFFSHORE
<b>2021</b>	420,6	399,8	535,7
<b>2030</b>	268,5	242,2	330,0
<b>2050</b>	155,1	145,2	179,1



Abbildung 18: Ländersteckbrief Spanien

# SPANIEN



## VERFÜGBARKEIT

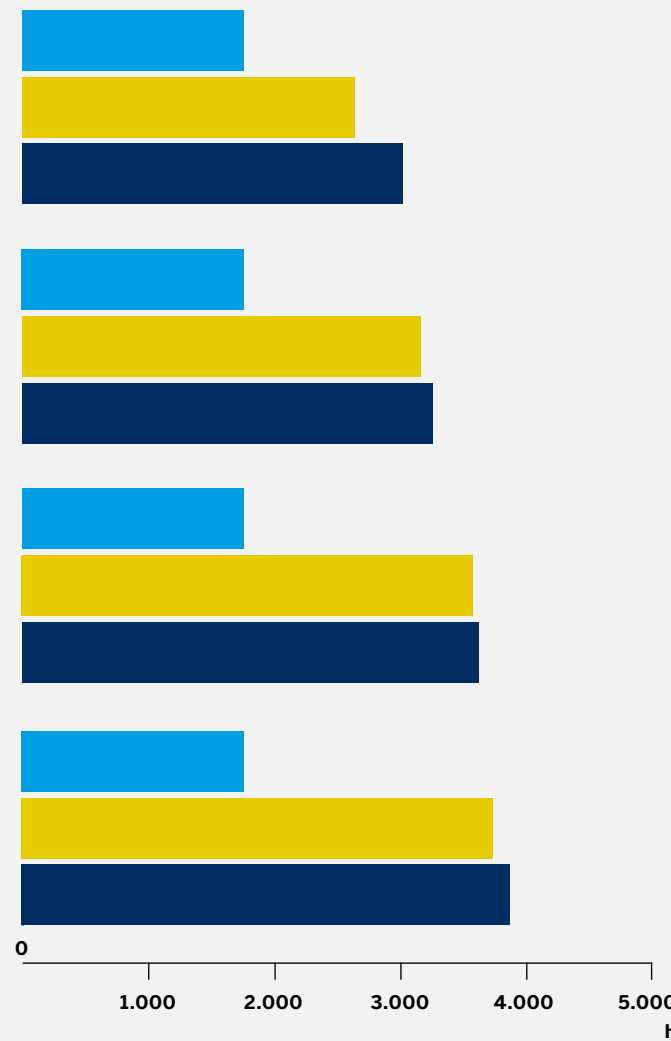
- Stromversorgung EE 2019: 37%\*
- Rohölimport Deutschland 2018: 0\*\*
- Produktion von grünem Wasserstoff ab 2023 geplant
- Weighted Average Cost of Capital (WACC)\*\*\*: PV 7,1%; Wind (On- und Offshore) 8,1%

## TRANSPORT

- Pipeline nach Duisburg (1.450 km)
- Schiff vom Bilbao Hafen zum Hamburger Hafen (1.900 km)
- Produktanker: 0,23 €/MWh<sub>eFuel</sub>; Pipeline: 0,34 €/MWh<sub>eCrude</sub>

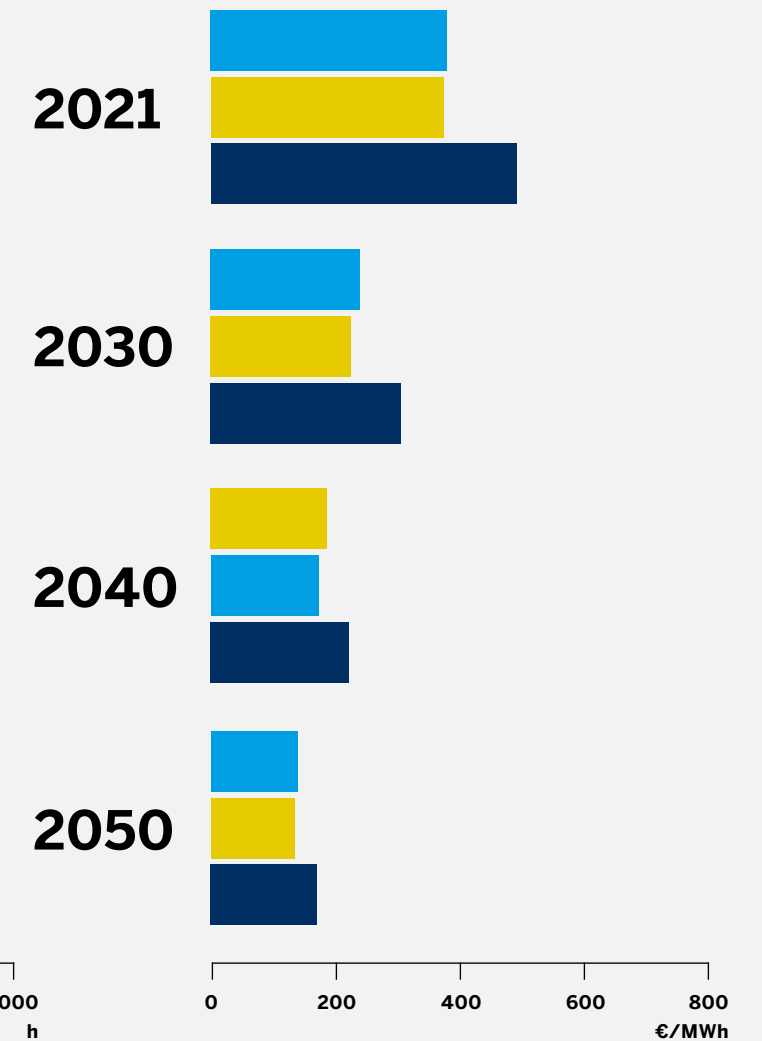
\* IEA (2021) World Energy Balances 2020. \*\* MWV (2020) Jahresbericht 2020. \*\*\* Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten einer Unternehmung.

## VOLLASTSTUNDEN



- PV
- Wind Onshore
- Wind Offshore

## PtL-GESTEHUNGSKOSTEN



## INKLUSIVE TRANSPORT

€/MWH	PV	WIND ONSHORE	WIND OFFSHORE
<b>2021</b>	381,8	376,2	493,4
<b>2030</b>	242,1	227,1	307,4
<b>2050</b>	140,5	136,5	172,6

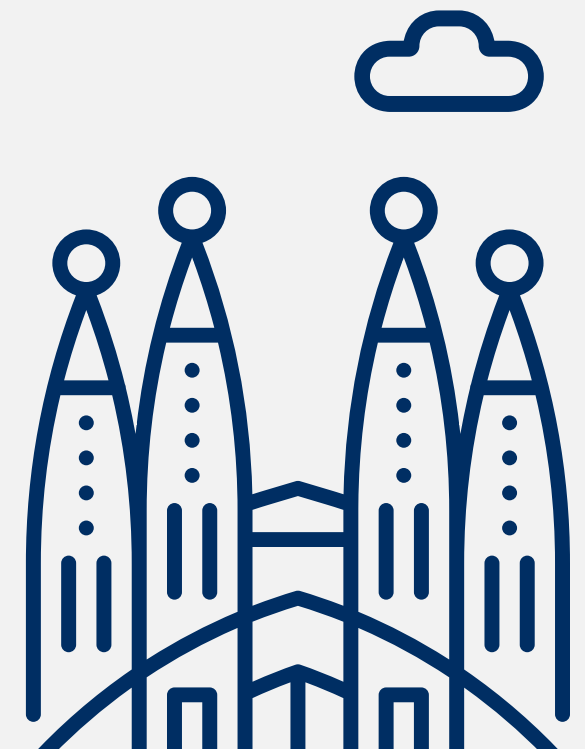


Abbildung 19: Ländersteckbrief Norwegen

# NORWEGEN



## VERFÜGBARKEIT

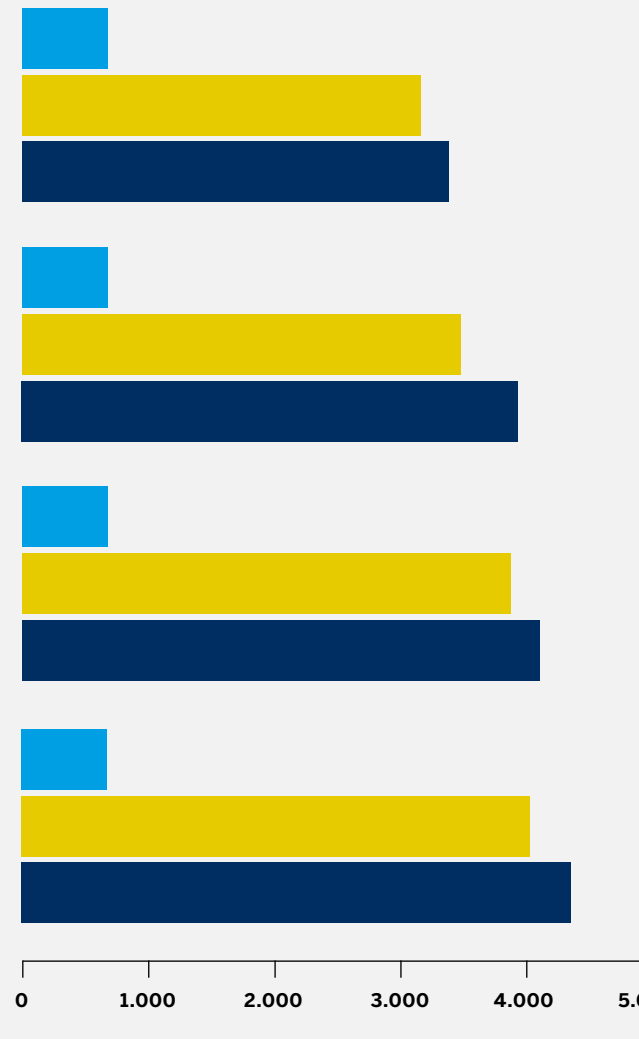
- Stromversorgung EE 2019: 95%\*
- Rohölimport Deutschland 2018: 10.044 Tsd. t\*\*
- Produktion von grünem Wasserstoff ab 2035 geplant
- Weighted Average Cost of Capital (WACC)\*\*\*: PV 7,5 %; Wind (On- und Offshore) 8,5%

## TRANSPORT

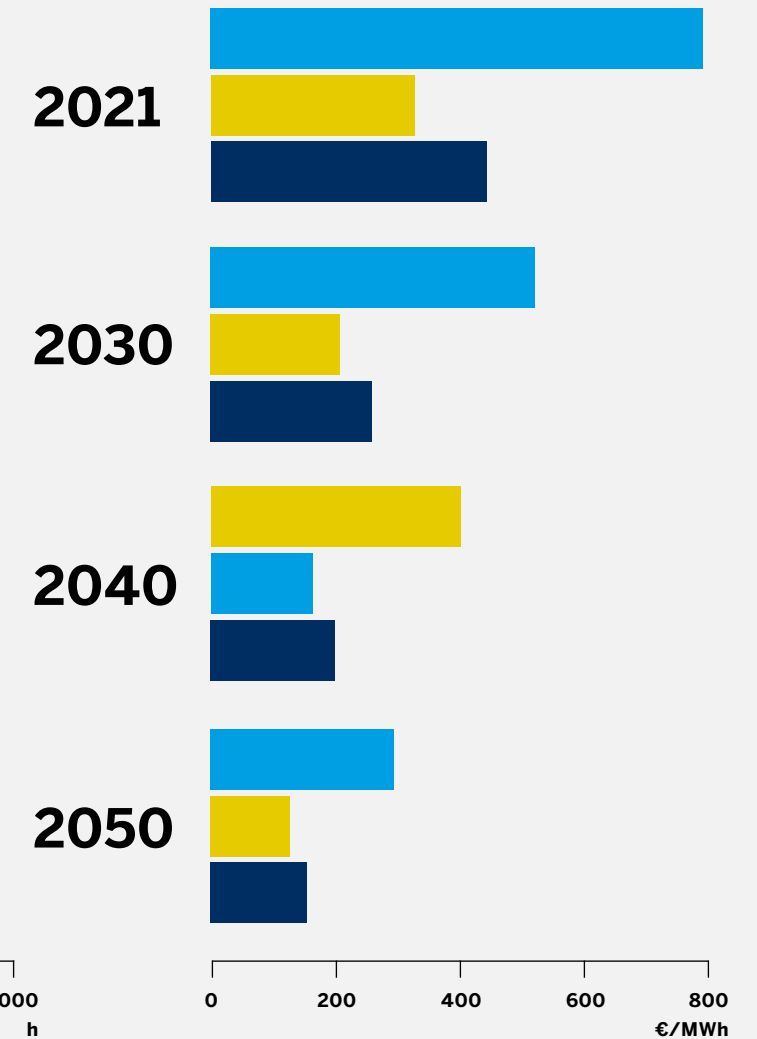
- Pipeline nach Duisburg (950 km)
- Schiff vom Kårstø Hafen zum Hamburger Hafen (750 km)
- Produktanker: 0,12 €/MWh<sub>eFuel</sub>; Pipeline: 0,22 €/MWh<sub>eCrude</sub>

\* IEA (2021) World Energy Balances 2020. \*\* MWV (2020) Jahresbericht 2020. \*\*\* Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten einer Unternehmung.

## VOLLASTSTUNDEN



## PtL-GESTEHUNGSKOSTEN



- PV
- Wind Onshore
- Wind Offshore

## INKLUSIVE TRANSPORT

€/MWH	PV	WIND ONSHORE	WIND OFFSHORE
<b>2021</b>	793,3	328,0	444,0
<b>2030</b>	522,6	162,4	260,2
<b>2050</b>	295,7	127,6	155,4





Synthetische Kraftstoffe bieten dank ihrer Speichermöglichkeit und der vergleichsweise günstigen Transportkosten die Möglichkeit, die globalen Flächenpotenziale und Potenziale erneuerbarer Energien zu nutzen. Langfristig ist hier auch eine starke Diversifikation der Bezugsländer denkbar. Allerdings muss der Aufbau von Produktionskapazitäten auch in außereuropäischen Ländern unterstützt werden, um die Potenziale nutzbar zu machen.<sup>38</sup>

Der H2Global-Mechanismus ist deshalb von zentraler Bedeutung und sollte auch für die Produktion synthetischer Kraftstoffe zum Zug kommen und so den globalen Markthochlauf unterstützen. Eine einheitlich koordinierte Importstrategie des Bundes für Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe wäre darüber hinaus für die zuverlässige Versorgung dringend notwendig, gerade für Nordrhein-Westfalen als Verbrauchsschwerpunkt.

## H2Global

**H2Global ist ein Förderprogramm der Bundesregierung, um den globalen Markthochlauf und den Import von Wasserstoff und dessen Derivaten zu unterstützen. Mit H2Global sollen Investitionen in grüne Wasserstoff-Erzeugungskapazitäten im Ausland und optional in Deutschland angereizt werden.**

Der Wasserstoff und dessen Derivate sollen mittels Doppelauktionsmechanismus nach Deutschland importiert werden. So soll eine globale Wasserstoff-Wertschöpfungskette aufgebaut werden.<sup>39</sup> Die erwarteten künftigen Bedarfe nicht nur für Wasserstoff, sondern auch für synthetische Kraftstoffe erfordern eine systematische Erschließung von Importmärkten. Hierfür bedarf es eines koordinierten Zusammenwirkens verschiedener Politikfelder, die in einer nationalen Importstrategie aufgehen sollten. Die bestehenden Ansätze und Instrumente – insbesondere H2Global – müssen in der Nationalen Wasserstoffstrategie weiterentwickelt und systematisch erschlossen werden.

## Die Kernaussagen des Kapitels:

1

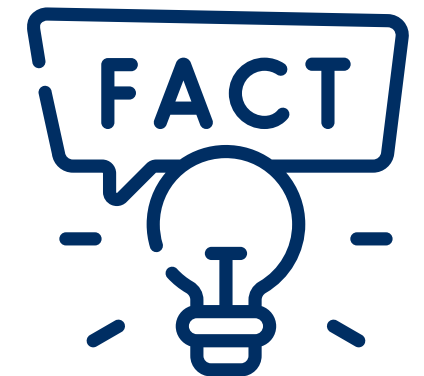
Sowohl die Nachfrage als auch die Produktion werden sich künftig in einem internationalen Markt entwickeln. Der größte Kostenfaktor bei der Herstellung synthetischer Kraftstoffe sind die Stromgestehungskosten. Synthetische Kraftstoffe werden voraussichtlich überwiegend in Regionen mit großen Potenzialen für erneuerbare Stromerzeugung hergestellt werden.

2

Die Importmenge für NRW wird im Jahr 2050 bei 129 TWh pro Jahr liegen. Die heimische Produktion wird voraussichtlich bei 10 TWh liegen.

3

Um die Nachfrage an synthetischen Kraftstoffen in Nordrhein-Westfalen bedienen zu können, sind neben internationalen Partnerschaften auch die entsprechenden Infrastrukturen vorzubereiten, sofern diese noch nicht vorhanden sind. Die Bundesregierung muss darüber hinaus eine ganzheitliche und kohärente Importstrategie für Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe aufsetzen und zügig umsetzen. Synthetische Kraftstoffe bieten wichtige industriepolitische Chancen für Nordrhein-Westfalen. Sie werden Teil der Transformationsprozesse der Raffinerien und chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen und bieten diesen neue Geschäftsmodelle.



4

Die globale Nachfrage nach Klimaschutztechnologien bietet einen Absatzmarkt für in NRW entwickelte Anlagen, Komponenten und Ideen.

5

Cross-industrielle Kooperationen sind der Schlüssel für den sektorübergreifenden Transformationsprozess in Richtung Klimaneutralität 2045. Nordrhein-Westfalen wird Modellstandort für künftige PtX-Strukturen.

## 06

60–65  
Aktionsplan

⊕ Für konsequenten Klimaschutz brauchen wir synthetische Kraftstoffe zu wettbewerbsfähigen Preisen. Mit dem Aktionsplan synthetische Kraftstoffe unterstützt das MWIDE den Markthochlauf gezielt und stärkt die wirtschaftliche Zukunft Nordrhein-Westfalens nachhaltig.

Auf dem Weg in die Klimaneutralität sind synthetische Kraftstoffe ein wichtiger Bestandteil. Ihr Markthochlauf muss jetzt angereizt werden, um rechtzeitig den steigenden Bedarf decken zu können. Nur durch richtige Rahmenbedingungen und Planungssicherheit können die Produktion skaliert und damit die Produktionskosten ge-

senkt werden. Das MWIDE setzt sich gezielt für die Schaffung dieser Rahmenbedingungen und für das Heben der industriepolitischen Chancen für Nordrhein-Westfalen ein. Nordrhein-Westfalen kann zum Modellstandort werden, der beweist, dass Klimaschutz und wirtschaftliche Chancen untrennbar miteinander verbunden sind.

Damit das gelingt, unterstützt das MWIDE den Markthochlauf synthetischer Kraftstoffe in folgenden Aktionsfeldern:



## A1 Umsetzung der Wasserstoff-Roadmap NRW zügig vorantreiben

Für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen werden große Mengen an Wasserstoff benötigt. Um die Verfügbarkeit von kostengünstigem Wasserstoff in ausreichenden Mengen sicherzustellen, wird die Landesregierung die Wasserstoff-Roadmap NRW zügig umsetzen und insbesondere mit folgenden Maßnahmen den Markthochlauf synthetischer Kraftstoffe beschleunigen:

- Unterstützung des zügigen Aufbaus von Elektrolysekapazitäten in NRW
- Schnellstmöglicher Aufbau der Transport- und Importinfrastruktur von Wasserstoff. Dazu zählt die schnelle Umsetzung des Important Project of Common European Interest (IPCEI)-Vorhabens „Get H<sub>2</sub>“.



## A2 Geeignete Rahmenbedingungen für den Markthochlauf synthetischer Kraftstoffe schaffen

Um synthetische Kraftstoffe in die Wirtschaftlichkeit zu bringen, müssen geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden, die den wirtschaftlichen Betrieb von Produktionsanlagen ermöglichen und für ein einheitliches Nachweissystem sorgen. Dies werden wir durch folgende Maßnahmen unterstützen:

- Das MWIDE setzt sich bei Bund und EU für die Schaffung der notwendigen Rahmenbedingungen für die Produktion und den Import synthetischer Kraftstoffe ein. Das schließt ein harmonisiertes PtX-Zertifizierungssystem auf Bundes-, EU- und internationaler Ebene ein.
- Das MWIDE setzt sich für die schnelle Umsetzung der Beimischungsquote von synthetischem Kerosin im Flugverkehr ein. Dies ist zentral für die Planungssicherheit beim Aufbau von Produktionsanlagen.



## A3 Forschung und Entwicklung fördern: Optimierungs- und Effizienzpotenziale heben

Viele der Technologien haben zwar bereits einen hohen Reifegrad erreicht, es bestehen aber noch Optimierungs- und Effizienzpotenziale. Diese tragen auch zur Produktionskostensenkung bei und werden in NRW durch gezielte Förderung von F&E-Projekten gehoben.

- Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten zur Machbarkeit und Umsetzung von Produktion synthetischer Kraftstoffe in NRW
- Förderung von Innovationsprojekten, die zur Optimierung von Produktionsprozessen beitragen
- Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten zum Bezug von CO<sub>2</sub> und den dafür benötigten Technologien (z. B. Direct Air Capture).



## A4 Produktionskapazitäten und Infrastrukturen aufbauen

NRW wird zum Modellstandort für neue Wertschöpfungsketten. Es werden Produktionsanlagen für Fischer-Tropsch-Produkte und Methanol gebaut. Nur mit der ausreichend verfügbaren und qualitativ geeigneten CO<sub>2</sub>-Menge können synthetische Kraftstoffe an den Raffinerie- und Chemiestandorten produziert werden. Es wird die benötigte CO<sub>2</sub>-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen schnellstmöglich aufgebaut und damit die Carbon Management Strategie NRW zügig umgesetzt:

- Realisierung mindestens einer Demonstrationsanlage zur Herstellung synthetischer Kraft- und Rohstoffe mittels Fischer-Tropsch-Synthese mit einer Kapazität von 100.000 Tonnen PtL pro Jahr in Nordrhein-Westfalen
- Aufbau der ersten klimaneutralen Methanol-Synthese mit mindestens 15.000 Tonnen Methanol pro Jahr. Hierfür wird das IPCEI-Vorhaben „Chem-CH<sub>2</sub>ange“ unterstützt. Eine Kofinanzierung durch das Land NRW ist geplant.
- Planung einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur in Nordrhein-Westfalen und über die Landesgrenzen hinaus und technische Erprobung des CO<sub>2</sub>-Transports
- Initiierung eines Förderwettbewerbs „CCU-Modellregionen in Nordrhein-Westfalen“. Das MWIDE identifiziert im Rahmen eines Wettbewerbs drei bis fünf Modellregionen in NRW, inklusive der dortigen Akteure, in denen die Abscheidung und Nutzung von CO<sub>2</sub> gefördert werden sollen.



## A5 Internationale Partnerschaften

Synthetische Kraftstoffe werden ein international produziertes und gehandeltes Produkt sein. Internationale Partnerschaften und Kooperationen werden entwickelt und aufgebaut, um die benötigten Mengen an synthetischen Kraftstoffen möglichst kostengünstig und zuverlässig nach Nordrhein-Westfalen importieren zu können. Nordrhein-westfälische Unternehmen werden dabei unterstützt, Exportpotenziale für Klimaschutztechnologien zu nutzen.

- Das MWIDE initiiert und setzt europäische und internationale Kooperationen zum Aufbau von Importketten um.
- Auf Bundesebene setzt sich das MWIDE für eine langfristige und umfassende Förderung des H2Global-Mechanismus ein und für eine kohärente Importstrategie für Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe.
- Unternehmen werden mit Informationsveranstaltungen zu Potenzialmärkten (z. B. MENA-Region) und zu Fördermöglichkeiten auf NRW-, Bundes-, und EU-Ebene bei der Erschließung von Exportmärkten unterstützt.
- Matchmaking-Veranstaltungen für Unternehmen für den PtX-Bereich werden angeboten.

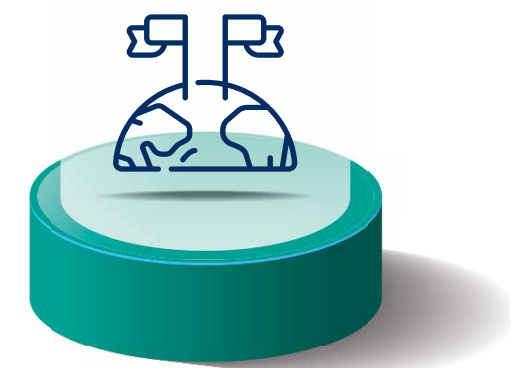




Abbildung 20: Zeitschiene des Aktionsplans

2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029 2030



A1

Aufbau Elektrolysekapazitäten

1

Aufbau der Transport- und Importinfrastruktur von Wasserstoff



A2

Entwicklung und Umsetzung Nachweis- und Zertifizierungssystem

Schaffen von geeigneten Rahmenbedingungen



A3

Förderung von F&E-Projekten



A4

Aufbau von FT-Anlagen

2

Aufbau Methanol-Synthesen

3

Planung und anschließender Aufbau der CO<sub>2</sub>-Transportinfrastrukturen

CCU-Modellregion NRW



A5

Aufbau und Intensivierung internationaler Partnerschaften und Erschließung von Exportmärkten

Meilensteine



1 bis 3 GW Elektrolyse in NRW



Inbetriebnahme FT-Anlagen mit einer Kapazität von 100.000 l/a



Inbetriebnahme Methanol-Synthese mit einer Kapazität von 15.000 Tonnen/a

# Quellenverzeichnis

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung waren alle Internetquellen in der hier zitierten Form abrufbar.

<sup>1</sup> Die Zahlen beruhen auf den Ergebnissen der wissenschaftlichen Begleitstudie des Forschungszentrums Jülich und Abschätzungen des MWIDE im Rahmen der Wasserstoff-Roadmap NRW.

<sup>2</sup> European Commission. 2021. <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12303-ReFuelEU-Aviation-Sustainable-Aviation-Fuels>.

<sup>3</sup> Bundesregierung. 10. 10 2021. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschonender-verkehr-1794672>.

<sup>4</sup> Synthetische Kraftstoffe stehen im Handlungskonzept ausschließlich für strombasierte Kraftstoffe, die mittels Elektrolyse und Synthese hergestellt werden.

<sup>5</sup> UBA. „Integration von PtG/PtL in den laufenden Transformationsprozess.“ 2016. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position\\_power\\_to\\_gas-power\\_to\\_liquid\\_web.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf).

<sup>6</sup> Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, Frontier Economics. „Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe.“ 2018. [https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost\\_2050/Agora\\_SynCost-Studie\\_WEB.pdf](https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf).

<sup>7</sup> Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, Frontier Economics. „Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe.“ 2018. [https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost\\_2050/Agora\\_SynCost-Studie\\_WEB.pdf](https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf).

<sup>8</sup> DLR. 2018. Klimaneutrale synthetische Kraftstoffe im Verkehr. Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). [https://elib.dlr.de/126963/1/DLR\\_VT\\_Fuels\\_Studie\\_Verkehr\\_V1.2.pdf](https://elib.dlr.de/126963/1/DLR_VT_Fuels_Studie_Verkehr_V1.2.pdf) Abgerufen am 05.08.2021.

<sup>9</sup> DLR. 2018. Klimaneutrale synthetische Kraftstoffe im Verkehr. Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). [https://elib.dlr.de/126963/1/DLR\\_VT\\_Fuels\\_Studie\\_Verkehr\\_V1.2.pdf](https://elib.dlr.de/126963/1/DLR_VT_Fuels_Studie_Verkehr_V1.2.pdf) Abgerufen am 05.08.2021.

<sup>10</sup> NPM. „Werkstattbericht alternative Kraftstoffe – Klimawirkungen und Wege zum Einsatz alternativer Kraftstoffe.“ Berlin: Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, 2020.

CENA Hessen, Kompetenzzentrum Klima- und Lärmschutz im Luftverkehr. „Betrachtung und Ausblick der Technologie zur Herstellung von PtL.“ 2021. [https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2020/3146\\_CENA\\_Hessen\\_2021\\_PtL.pdf](https://redaktion.hessen-agentur.de/publication/2020/3146_CENA_Hessen_2021_PtL.pdf).

Öko-Institut e. V. „E-Fuels im Verkehrssektor.“ 2020. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/E-Fuels-im-Verkehrssektor-Hintergrundbericht.pdf>.

Öko-Institut e. V. „Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland.“ 2019. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PtX-Hintergrundpapier.pdf>.

<sup>11</sup> Öko-Institut e. V. „Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland.“ 2019. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PtX-Hintergrundpapier.pdf>.

<sup>12</sup> UBA. „Integration von PtG/PtL in den laufenden Transformationsprozess.“ 2016. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position\\_power\\_to\\_gas-power\\_to\\_liquid\\_web.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf).

<sup>13</sup> UBA. „Integration von PtG/PtL in den laufenden Transformationsprozess.“ 2016. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position\\_power\\_to\\_gas-power\\_to\\_liquid\\_web.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf).

<sup>14</sup> Wuppertal Institut. Kurzepertise zur Bedeutung von synthetischen PtX-Kraftstoffen für das Land NRW. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2021.

<sup>15</sup> Wuppertal Institut. Kurzepertise zur Bedeutung von synthetischen PtX-Kraftstoffen für das Land NRW. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2021.

<sup>16</sup> Wuppertal Institut. Kurzepertise zur Bedeutung von synthetischen PtX-Kraftstoffen für das Land NRW. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2021.

<sup>17</sup> Wuppertal Institut. Kurzepertise zur Bedeutung von synthetischen PtX-Kraftstoffen für das Land NRW. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2021.

<sup>18</sup> NPM. 2020. Werkstattbericht alternative Kraftstoffe. Klimawirkungen und Wege zum Einsatz alternativer Kraftstoffe. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität. Von [https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM\\_AG1\\_Werkstattbericht\\_AK.pdf](https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_AK.pdf) abgerufen.

<sup>19</sup> Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut 2020. „Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.“ [www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020\\_10\\_KNDE/A-EW\\_195\\_KNDE\\_WEB.pdf](https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf).

<sup>20</sup> FZ Jülich 2012. CO<sub>2</sub>-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung: Technische, wirtschaftliche, umweltseitige und gesellschaftliche Perspektive. Von <https://user.fz-juelich.de/record/131987/files/FZJ-131987.pdf> abgerufen.

<sup>21</sup> UBA. „Integration von PtG/PtL in den laufenden Transformationsprozess.“ 2016. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position\\_power\\_to\\_gas-power\\_to\\_liquid\\_web.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf).

<sup>22</sup> Peter Viebahn, Alexander Scholz und Ole Zelt. „Entwicklungsstand und Forschungsbedarf von Direct Air Capture: Ergebnis einer multidimensionalen Analyse.“ *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69. Jg. (2019), Heft 12, S. 30–33.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut 2020. „Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.“ [www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020\\_10\\_KNDE/A-EW\\_195\\_KNDE\\_WEB.pdf](https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf).

<sup>23</sup> Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut 2020. „Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität.“ [www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020\\_10\\_KNDE/A-EW\\_195\\_KNDE\\_WEB.pdf](https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf).

<sup>24</sup> Peter Viebahn, Alexander Scholz und Ole Zelt. „Entwicklungsstand und Forschungsbedarf von Direct Air Capture: Ergebnis einer multidimensionalen Analyse.“ *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69. Jg. (2019), Heft 12, S. 30–33.

<sup>25</sup> Eigene Darstellung, basierend auf Gatzen und Bothe 2019.

Christoph Gatzen und David Bothe. „Kohlenstoffbasierte EFuels – wird der „grüne“ Kohlenstoff zur knappen Ressource?“ In „Zukünftige Kraftstoffe: Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel“ von Wolfgang Maus, S. 114–124. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2019.

<sup>26</sup> Peter Viebahn, Alexander Scholz und Ole Zelt. „Entwicklungsstand und Forschungsbedarf von Direct Air Capture: Ergebnis einer multidimensionalen Analyse.“ *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69. Jg. (2019), Heft 12, S. 30–33.

<sup>27</sup> DLR. Institut für Future Fuels. 2021. [https://www.dlr.de/ff/desktopdefault.aspx/tabid-15564/25248\\_read-63151/](https://www.dlr.de/ff/desktopdefault.aspx/tabid-15564/25248_read-63151/).

<sup>28</sup> dena. „Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität.“ 2021. [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht\\_dena-Leitstudie\\_Aufbruch\\_Klimaneutralitaet.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf).

<sup>29</sup> MWV. MWV-Jahresbericht 2019. <https://www.mwv.de/statistiken/grafiken-jahresbericht-zahlen/>.

<sup>30</sup> Öko-Institut e. V. „Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland.“ 2019. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PtX-Hintergrundpapier.pdf>.

<sup>31</sup> Wuppertal Institut. Kurzepertise zur Bedeutung von synthetischen PtX-Kraftstoffen für das Land NRW. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2021.

<sup>32</sup> Wuppertal Institut. Kurzepertise zur Bedeutung von synthetischen PtX-Kraftstoffen für das Land NRW. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2021.

<sup>33</sup> Wuppertal Institut. Kurzepertise zur Bedeutung von synthetischen PtX-Kraftstoffen für das Land NRW. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2021.

<sup>34</sup> Wuppertal Institut. Kurzepertise zur Bedeutung von synthetischen PtX-Kraftstoffen für das Land NRW. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, 2021.

<sup>35</sup> Prognos. „Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende.“ 2018. [https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/images/pressemitteilungen/2018/EndberichtPrognos/Prognos-Endbericht\\_Fluessige\\_Energietraeger\\_Web-final.pdf](https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/images/pressemitteilungen/2018/EndberichtPrognos/Prognos-Endbericht_Fluessige_Energietraeger_Web-final.pdf).

<sup>36</sup> (Chemische Industrie | NRW.GLOBAL Business (nrwinvest.com) <https://www.nrwinvest.com/de/branchen-in-nrw/chemische-industrie/>

<sup>37</sup> MWV. MWV-Jahresbericht 2019. <https://www.mwv.de/statistiken/grafiken-jahresbericht-zahlen/>

<sup>38</sup> dena. „Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität.“ 2021. [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht\\_dena-Leitstudie\\_Aufbruch\\_Klimaneutralitaet.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf).

<sup>39</sup> H2Global Advisory GmbH. H2Global – Die globale Energiewende gestalten. 2021. <https://h2-global.de/#konzept>

## Impressum

### Herausgeber:

Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

Berger Allee 25

40213 Düsseldorf

Tel.: +49 (0) 211/61772-0

Fax: +49 (0) 211/61772-777

Internet: [www.wirtschaft.nrw](http://www.wirtschaft.nrw)

Referat VII.5

Energiesystem der Zukunft,

Wasserstoff, Klimaschutz in der Industrie

Die Broschüre ist auf der Homepage des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen als PDF-Dokument abrufbar.

### Hinweis

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Landesregierung Nordrhein-Westfalen herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerberinnen und -bewerbern oder Wahlhelferinnen und -helfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden.

Dies gilt auch für Landtags-, Bundestags- und Kommunalwahlen sowie für die Wahl der Mitglieder des Europäischen Parlaments.

Missbräuchlich sind insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Eine Verwendung dieser Druckschrift durch Parteien oder sie unterstützende Organisationen ausschließlich zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder bleibt hiervon unberührt. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin oder dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

© Dezember 2021

### Bildnachweise:

© MWIDE NRW/F. Wiedemeier (3),

© istockphoto.com/mmmxx (6),

© stock.adobe.com/pedrosala (10),

© stock.adobe.com/nirut saelim/EyeEm (12),

© unsplash/jacek-dylag (16),

© stock.adobe.com/Ivan Uralsky (32),

© stock.adobe.com/Kalyakan (40),

© stock.adobe.com/Maygutyak (60).

### Gestaltung:

[www.heimrich-hannot.de](http://www.heimrich-hannot.de)

**Ministerium für Wirtschaft, Innovation,  
Digitalisierung und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen**  
Berger Allee 25, 40213 Düsseldorf  
[www.wirtschaft.nrw](http://www.wirtschaft.nrw)

