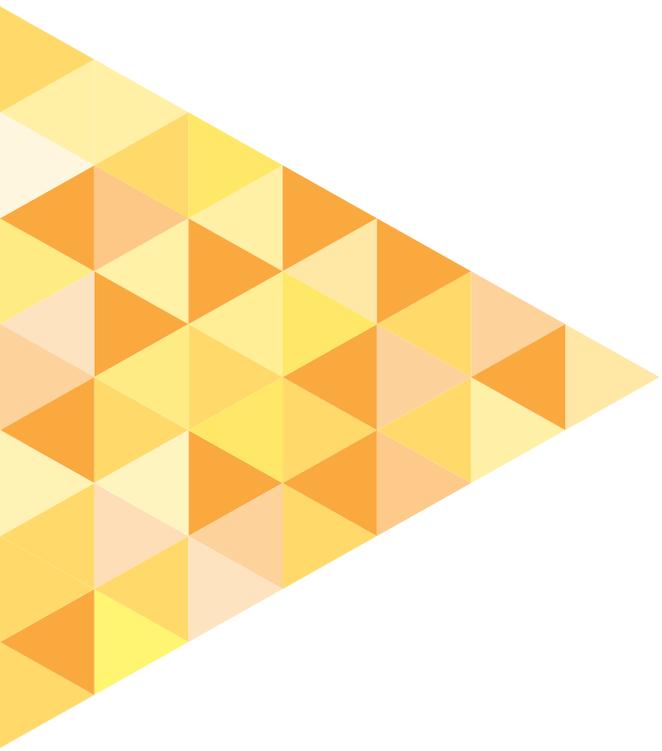


Anke Mönnig | Linus Ronsiek | Christian Schneemann |  
Alexander C. Schur | Johanna Zenk

# Grüner Wasserstoff und energieintensive Industrien



BIBB Discussion Paper

**VET** | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |  
**REPOSITORY**  
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |

Ein Gemeinschaftsprojekt von



Zitiervorschlag:

Mönnig, Anke; Ronsiek, Linus; Schneemann, Christian; Schur, Alexander C.; Zenk, Johanna: Grüner Wasserstoff und energieintensive Industrien. Version 1.0 Bonn, 2024.  
Online: [https://res.bibb.de/vet-repository\\_782464](https://res.bibb.de/vet-repository_782464).



© Bundesinstitut für Berufsbildung, 2024

Version 1.0  
Juni 2024

**Herausgeber**

Bundesinstitut für Berufsbildung  
Friedrich-Ebert-Allee 114-116  
53113 Bonn  
Internet: [www.vet-repository.info](http://www.vet-repository.info)  
E-Mail: [repository@bibb.de](mailto:repository@bibb.de)

Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle übernimmt das BIBB keine Haftung für die Inhalte externer Links. Für den Inhalt der verlinkten Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich.

**CC Lizenz**

Der Inhalt dieses Werkes steht unter Creative-Commons-Lizenz (Lizenztyp: Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International).

Weitere Informationen finden sie im Internet auf unserer Creative-Commons-Infoseite

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>.

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Diese Netzpublikation wurde bei der Deutschen Nationalbibliothek angemeldet und archiviert:

urn:nbn:de:0035-vetrepository-782464-7

---

## Grüner Wasserstoff und energieintensive Industrien

Anke Mönnig<sup>1</sup>, Linus Ronsiek<sup>1</sup>, Christian Schneemann<sup>2</sup>, Alexander C. Schur<sup>3</sup>, Johanna Zenk<sup>2</sup>

---

### Abstract:

Die Umstellung auf grünen Wasserstoff zur Dekarbonisierung der deutschen Industrie erfordert beträchtliche Investitionen und Anpassungen in den Produktionsprozessen. Ziel dieser Studie ist es, ein umfassendes Verständnis für die Transformationsanforderungen in verschiedenen Branchen zu gewinnen. Dabei werden Informationen zu möglichen Wasserstoffbedarfen in den Industrien gesammelt und aktuelle Kosten- und Nachfragestrukturen dahingehend untersucht, ob sich diese im Zuge der Transformation in eine grüne Wasserstoffwirtschaft ändern könnten. Die Analyse zeigt, dass die Transformation je nach Branche unterschiedliche Herausforderungen und Chancen birgt. Neben wirtschaftlichen Faktoren spielen auch strukturelle Aspekte eine entscheidende Rolle für den Erfolg der Transformation, darunter der Ausbau der Infrastruktur und die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff.

---

<sup>1</sup> Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH, Bereich „Wirtschaft und Soziales“

<sup>2</sup> Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung, Forschungsbereich „Prognosen und gesamtwirtschaftliche Analysen“

<sup>3</sup> Bundesinstitut für Berufsbildung, Arbeitsbereich 1.2, „Qualifikation, berufliche Integration, Erwerbstätigkeit“

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	7
1 Auswahl der betroffenen Industriezweige .....	8
1.1 Endenergieverbrauch der Industrien.....	8
1.2 CO2-Emissionen der Industrien .....	10
2 Verarbeitendes Gewerbe.....	13
2.1 Papierindustrie (WZ 17).....	13
2.1.1 Produktionsprozesse .....	13
2.1.2 Nachfrage- und Kostenstruktur .....	14
2.1.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf.....	16
2.1.4 Fazit.....	16
2.2 Kokerei und Mineralölverarbeitung (WZ 19).....	17
2.2.1 Produktionsprozesse .....	17
2.2.2 Nachfrage- und Kostenstruktur .....	18
2.2.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf.....	20
2.2.4 Fazit.....	20
2.3 Herstellung von chemischen Erzeugnissen (WZ 20).....	21
2.3.1 Produktionsprozesse .....	21
2.3.2 Nachfrage- und Kostenstruktur .....	26
2.3.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf.....	28
2.3.4 Fazit.....	29
2.4 Glasindustrie (WZ 23.1).....	30
2.4.1 Produktionsprozess .....	30
2.4.2 Nachfrage- und Kostenstruktur .....	32
2.4.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf.....	34
2.4.4 Fazit.....	34
2.5 Zementindustrie (WZ 23.51).....	34
2.5.1 Produktionsprozesse .....	34
2.5.2 Nachfrage- und Kostenstruktur .....	36
2.5.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf.....	38

2.5.4	Fazit.....	38
2.6	Stahlindustrie (WZ 24.1) .....	38
2.6.1	Produktionsprozesse .....	39
2.6.2	Nachfrage- und Kostenstruktur .....	40
2.6.3	Geschätzter Wasserstoffbedarf.....	42
2.6.4	Fazit.....	43
2.7	Elektrische Ausrüstung (WZ 27) und Maschinenbau (WZ 28) .....	44
2.7.1	Produktionsprozesse .....	44
2.7.2	Nachfrage- und Kostenstruktur .....	44
2.7.3	Geschätzter Wasserstoffbedarf.....	47
2.7.4	Fazit.....	47
3	Energieversorgung.....	48
3.1	Elektrizitätsversorgung (WZ 35.1).....	48
3.1.1	Produktionsprozesse .....	48
3.1.2	Nachfrage- und Kostenstruktur .....	50
3.1.3	Geschätzter Wasserstoffbedarf.....	52
3.1.4	Fazit.....	52
3.2	Gasversorger (WZ 35.2) .....	53
3.2.1	Produktionsprozesse .....	53
3.2.2	Nachfrage- und Kostenstruktur .....	54
3.2.3	Geschätzter Wasserstoffbedarf.....	55
3.2.4	Fazit.....	56
4	Verkehrssektor.....	56
4.1	Produktionsprozesse.....	56
4.2	Geschätzter Wasserstoffbedarf .....	59
4.3	Fazit .....	59
5	Tabellarische Zusammenfassungen.....	60
6	Fazit und Ausblick .....	65
7	Literaturverzeichnis .....	68

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil am Endenergieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes im Jahr 2019 nach Wirtschaftszweigen .....	9
Abbildung 2: Anteil am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors im Jahr 2019 nach Verkehrssektoren .....	9
Abbildung 3: CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Wirtschaftszweigen für das Jahr 2019.....	10
Abbildung 4: Anteil der CO <sub>2</sub> -Emissionen nach Verursachungstyp und nach Wirtschaftszweigen im verarbeitenden Gewerbe, 2019 .....	12
Abbildung 5: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Papierindustrie (WZ 17) nach Verwendungskomponenten, 2019 .....	14
Abbildung 6: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen der Papierindustrie (WZ 17), 2019 .....	15
Abbildung 7: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Papierindustrie (WZ 17), 2019	15
Abbildung 8: Raffinerieproduktion mit grünem Wasserstoff .....	18
Abbildung 9: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Kokerei und Mineralölindustrie (WZ 19) nach Verwendungskomponenten, 2019 .....	18
Abbildung 10: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von Kokerei und Mineralölprodukten (WZ 19), 2019 .....	19
Abbildung 11: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Kokerei und Mineralölindustrie (WZ 19), 2019 .....	20
Abbildung 12: Konventionelles und elektrisches Steamcracking-Verfahren .....	23
Abbildung 13: Herstellung von grünem Ammoniak.....	25
Abbildung 14: Mögliche Ammoniakproduktionskette .....	26
Abbildung 15: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Chemieindustrie (WZ 20) nach Verwendungskomponenten, 2019.....	27
Abbildung 16: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von chemischen Erzeugnissen (WZ 20), 2019 .....	27
Abbildung 17: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Chemieindustrie (WZ 20), 2019	28
Abbildung 18: Glasherstellungsprozess .....	31
Abbildung 19: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Glasindustrie (WZ 23.1) nach Verwendungskomponenten, 2019 .....	32

Abbildung 20: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von Glas und Glaswaren (WZ 23.1), 2019 .....	33
Abbildung 21: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Glasindustrie (WZ 23.1), 2019	33
Abbildung 22: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten Keramik-, Erden- und Steineindustrie (WZ 23.2–23.9) nach Verwendungskomponenten, 2019.....	36
Abbildung 23: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von Keramik und bearbeiteten Steinen und Erden (WZ 23.2–23.9), 2019 .....	37
Abbildung 24: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Keramik-, Erden- und Steineindustrie (WZ 23.2–23.9), 2019.....	37
Abbildung 25: Geeignete Routen für die Dekarbonisierung der Stahlindustrie .....	39
Abbildung 26: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Roheisen- und Stahlerzeugung (WZ 24.1–24.3) nach Verwendungskomponenten, 2019 .....	41
Abbildung 27: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von Roheisen, Stahl und ersten Erzeugnissen daraus (WZ 23.2–23.9), 2019.....	41
Abbildung 28: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Roheisen- und Stahlindustrie (WZ 24.1–24.3), 2019.....	42
Abbildung 29: Gesamte inländische und importierte Verwendung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27) und Maschinenbau (WZ 28) nach Verwendungskomponenten, 2019.....	45
Abbildung 30: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27) und Maschinen (WZ 28), 2019.....	46
Abbildung 31: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten für elektrische Ausrüstungen (WZ 27) und Maschinen (WZ 28), 2019.....	47
Abbildung 32: Gesamte inländische und importierte Verwendung von elektrischem Strom und Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung (WZ 35.1/35.3) nach Verwendungskomponenten, 2019.....	50
Abbildung 33: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von elektrischem Strom und Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung (WZ 35.1/35.3), 2019	51
Abbildung 34: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten für elektrischem Strom und Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung (WZ 35.1/35.3), 2019 .....	51
Abbildung 35: Durchschnittlicher Gasverbrauch in der Industrie und Haushalten/Gewerbe .....	53
Abbildung 36: Gesamte inländische und importierte Verwendung von industriell erzeugten Gasen (WZ 35.2) nach Verwendungskomponenten, 2019 .....	54

Abbildung 37: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von industriell erzeugtem Gas (WZ 35.2), 2019 .....	55
Abbildung 38: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten für industriell erzeugte Gase (WZ 35.2), 2019	55
Abbildung 39: E-Fuels, Brennstoffzelle und Wasserstoffmotor im Vergleich .....	57
Abbildung 40: Hemmnisse für eine erfolgreiche Transformation.....	66
Abbildung 41: Mögliches Schemata einer wasserstoffbasierten Wirtschaft .....	66
Abbildung 42: H <sub>2</sub> -Produktionsprojekte in Deutschland nach Projektstatus .....	67

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geschätzter Wasserstoffbedarf Papierindustrie .....	16
Tabelle 2: Geschätzter Wasserstoffbedarf der Kokerei und Mineralölverarbeitung .....	20
Tabelle 3: Geschätzter Wasserstoffbedarf der Chemieindustrie .....	29
Tabelle 4: Geschätzter Wasserstoffbedarf für die Glasindustrie .....	34
Tabelle 5: Geschätzter Wasserstoffbedarf für die Zementindustrie.....	38
Tabelle 6: Geschätzter Wasserstoffbedarf für die Stahlindustrie .....	42
Tabelle 7: Geschätzter Wasserstoffbedarf für den Stromsektor .....	52
Tabelle 8: Vergleich von Antriebstechnologien auf Wasserstoffbasis .....	58
Tabelle 9: Geschätzter Wasserstoffbedarf im Verkehrssektor .....	59
Tabelle 10: Zusammenfassung und Überblick .....	60
Tabelle 11: Zusammenfassung der Änderungen in der Nachfrage- und Kostenstruktur nach Branchen	

## Einleitung

Grüner Wasserstoff hat das Potenzial, einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung der Industrie in Deutschland zu leisten. Aufgrund der höheren Energieeffizienz ist zwar grundsätzlich die direkte Elektrifizierung vorzuziehen, allerdings existieren Bereiche, in denen eine Elektrifizierung nicht möglich ist – beispielsweise in Hochtemperaturanwendungen über 1000 °C (NEUWIRTH u. a. 2022). Im öffentlichen Fokus stehen hier vor allem die Stahl- und Chemieindustrie. Daneben gibt es in der deutschen Industrielandschaft jedoch noch weitere energieintensive Branchen, die durch den Einsatz von grünem Wasserstoff ihre Emissionen verringern könnten.

Bei der Transformation in eine grüne Wasserstoffwirtschaft haben die Industriezweige zwei Investitionsphasen zu durchlaufen. Zum einen sind Investitionen zur Herstellung von grünem Wasserstoff erforderlich. Dabei muss in die Herstellung von Elektrolyseuren investiert werden und für deren Betrieb v. a. erneuerbarer Strom eingekauft oder selbst erzeugt werden. Zum anderen muss der übrige Produktionsprozess auf die Verwendung von grünem Wasserstoff als Roh- oder Brennstoff angepasst werden – in vielen Fällen bedarf es dafür neue Anlagen oder Maschinen. Das erfordert je nach Branche und Produktionsprozess unterschiedlich hohe Investitionen.

Für den ersten Teil der Investitionstätigkeit wird davon ausgegangen, dass der Großteil der Elektrolyseinvestitionen von der Energiewirtschaft getätigt wird. Das heißt auch, dass ein Großteil des Bedarfes an grünem Wasserstoff von den Industrien eingekauft wird. Dennoch dürfte sich der Aufbau von eigenen Elektrolysekapazitäten vor allem für die Großverbraucher wie die Chemie- oder Stahlindustrie lohnen. Für die zweiten Investitionserfordernisse bedarf es konkreter Kenntnis über branchenspezifische Produktionsprozesse und wie die Möglichkeiten der Umstellung auf eine grüne wasserstoffbasierte Produktionstechnologie ausgestaltet sind.

Ziel dieser Studie ist es, ein besseres Branchenverständnis für die Transformationserfordernisse in den einzelnen Branchen zu erhalten. Dabei steht vor allem die Umstellung der Produktionsprozesse auf grünen Wasserstoff im Vordergrund. Es werden Informationen zu möglichen Wasserstoffbedarfen in den Industrien gesammelt und die Kosten- und Nachfragestruktur von heute dahingehend untersucht, ob sich diese im Zuge der Transformation in eine grüne Wasserstoffwirtschaft ändern könnten. Die Ergebnisse dieser vornehmlich auf Literaturrecherche basierenden Studie finden Eingang in das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt zu „Arbeitskräftebedarf und Arbeitskräfteangebot entlang der Wertschöpfungskette ‚Wasserstoff‘“.

Zur Identifizierung der betroffenen Branchen wird in Kapitel 1 zunächst untersucht, wie hoch der Energieverbrauch (Kapitel 1.1) und die CO<sub>2</sub>-Emissionen (Kapitel 1.2) in den Industriesektoren sind. Im

anschließenden Kapitel 2 werden Industriezweige des verarbeitenden Gewerbes näher untersucht. In Kapitel 3 ist der Energiesektor und in Kapitel 4 der Verkehrssektor genauer dargestellt.

Zu jedem Wirtschaftszweig ist neben der Darstellung der wichtigsten Produktionsprozesse auch der aus Drittquellen gesammelte, geschätzte Wasserstoffbedarf angegeben. Die Nachfrage- und Kostenstruktur nach Produktionsbereichen ist gemäß der Input-Output-Tabelle des Jahres 2019 dargestellt.<sup>4</sup> Es werden jeweils Abbildungen zur Verwendung der Gütergruppe nach seinen Verwendungskomponenten (Vorleistung und Endnachfrage) sowie zu den Liefer- und Kostenstrukturen gezeigt. Hierbei wird nicht zwischen inländischer Produktion und Importen unterschieden.

## 1 Auswahl der betroffenen Industriezweige

### 1.1 Endenergieverbrauch der Industrien

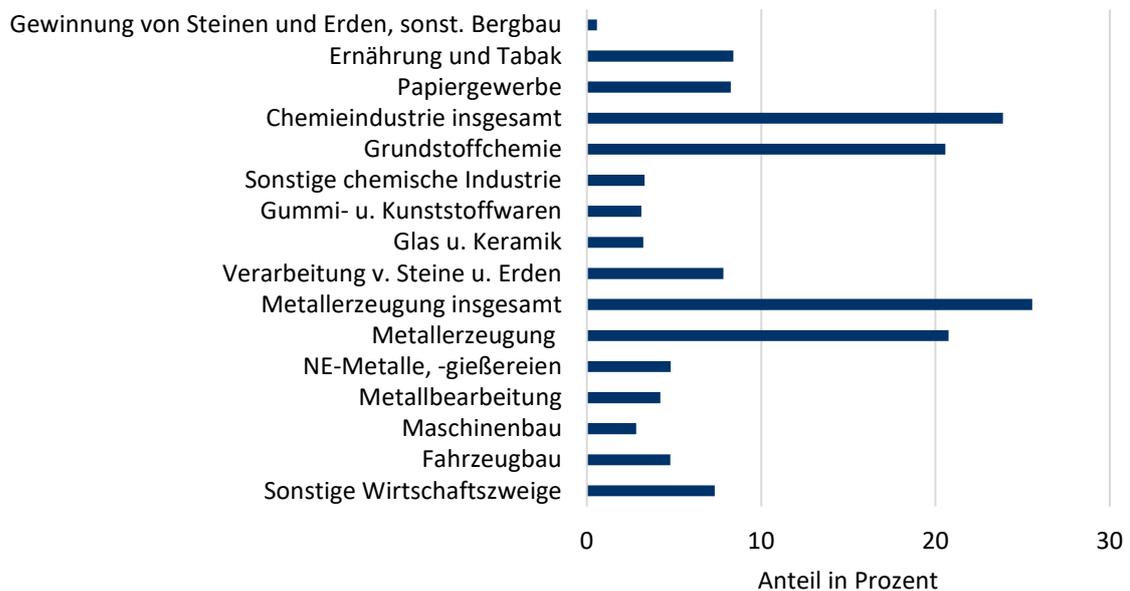
Die Verwendung von grünem Wasserstoff wird insbesondere in der Produktion von energieintensiven Industrien als besonders wert- und sinnvoll erachtet. 28 Prozent des gesamten Endenergieverbrauchs des Jahres 2019<sup>5</sup> entfielen auf das verarbeitende Gewerbe. Abbildung 1 zeigt die Anteile der verschiedenen Wirtschaftszweige am Endenergieverbrauchs des Verarbeitenden Gewerbes. Mit Abstand den höchsten Endenergieverbrauch weisen die Chemieindustrie (vgl. Kapitel 2.3), welche die Grundstoffchemie und die sonstige chemische Industrie umfasst, und die metallherstellende und -bearbeitende Industrie (vgl. Kapitel 2.6) mit einem Anteil von jeweils 24 respektive 26 Prozent auf. Das heißt, die Hälfte des Endenergieverbrauches ist allein in diesen beiden Industriezweigen verortet. Mit einigem Abstand folgt die Verarbeitung von Steinen und Erden (vgl. Kapitel 2.4 und 2.5), das Papiergewerbe (vgl. Kapitel 2.1) und die Herstellung von Nahrungsmitteln und Tabak. Unter die sonstigen Wirtschaftszweige fallen auch die Raffinerien (vgl. Kapitel 2.2).

---

<sup>4</sup> Zwar gibt es bereits eine Input-Output-Tabelle für das Jahr 2020, aufgrund der im Jahr 2020 ausgebrochenen Coronapandemie wird allerdings auf das Vorpandemiejahr 2019 zurückgegriffen.

<sup>5</sup> Zwar liegen die Energiebilanzen mittlerweile auch bis 2021 vor, um die Effekte der Coronapandemie nicht mit einzubeziehen, beziehen sich die Werte wie bei der Input-Output-Tabelle jedoch auf das Jahr 2019.

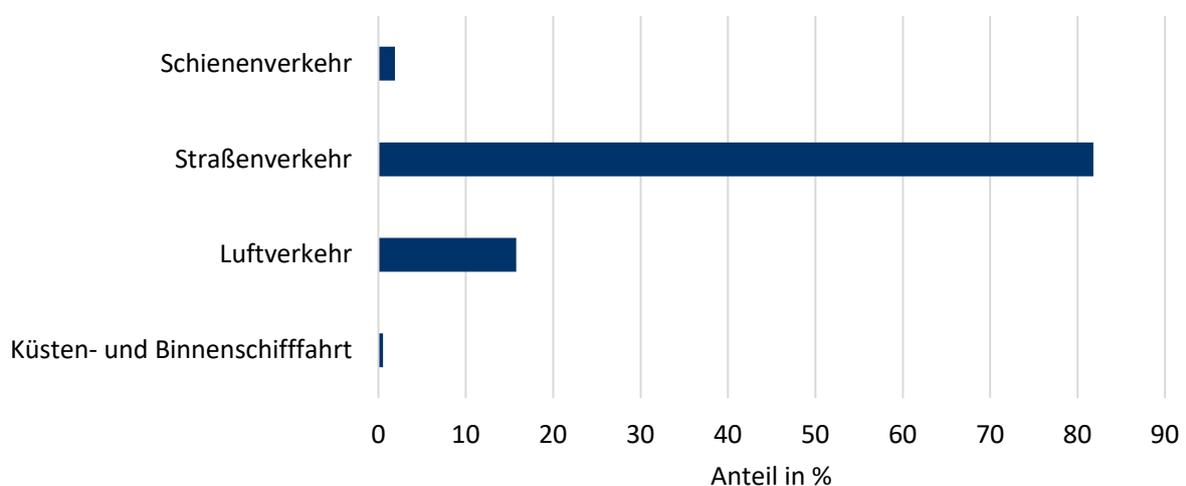
**Abbildung 1: Anteil am Endenergieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes im Jahr 2019 nach Wirtschaftszweigen**



Quelle: AG ENERGIEBILANZEN 2023; eigene Berechnung

Äquivalent zeigt Abbildung 2 den Anteil der vier Verkehrssektoren Wasser, Luft, Straße und Schiene als Anteil am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors (vgl. Kapitel 4) insgesamt. Während der Verkehrssektor insgesamt 30 Prozent des Endenergieverbrauchs auf sich vereint, ist unter den verschiedenen Verkehrsarten der Straßenverkehr der energieintensivste. 82 Prozent des Energieverbrauches geht im Verkehrssektor auf den Straßenverkehr zurück, mit großem Abstand gefolgt vom Luftverkehr (16 Prozent), Schienenverkehr (1,9 Prozent) und Schiffsverkehr (0,5 Prozent).

**Abbildung 2: Anteil am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors im Jahr 2019 nach Verkehrssektoren**



Quelle: AG ENERGIEBILANZEN 2023; eigene Berechnung

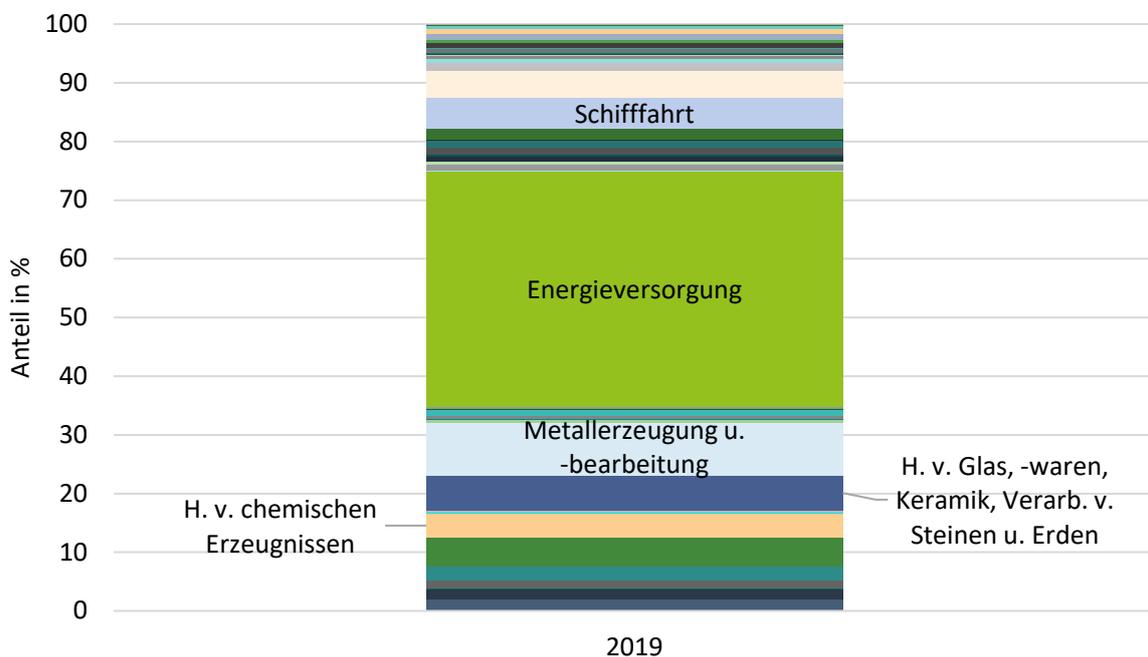
## 1.2 CO<sub>2</sub>-Emissionen der Industrien

Deutschland hat 2019 gemäß Abgrenzung des Kyoto-Protokolls 794 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> emittiert. Werden nur die energie- und prozessbedingten Emissionen der Wirtschaftszweige berücksichtigt – also ohne die Emissionen privater Haushalte –, wurden 2019 in Deutschland 651 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> produziert.

Abbildung 3 zeigt die Verteilung der nach Wirtschaftszweigen emittierten CO<sub>2</sub>-Emissionen für das Jahr 2019. Demnach verursacht der Energiesektor (vgl. Kapitel 3) bei Weitem die meisten CO<sub>2</sub>-Emissionen, gefolgt von der Metallerzeugung und -bearbeitung, der Herstellung von Glaswaren, Keramik und Verarbeitung von Steinen und Erden, der Chemieindustrie sowie der Schifffahrt.

Es kann eine hohe Korrelation zwischen Energieverbrauch (vgl. Kapitel 1.1) und CO<sub>2</sub>-Ausstoß beobachtet werden, gleichwohl insbesondere bei der Schifffahrt auffällt, dass der Endenergieverbrauch in diesen beiden Branchen in keinem Verhältnis zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen steht. Was allerdings damit zu begründen ist, dass in Abbildung 3 neben der Küsten- und Binnenschifffahrt auch die Hochseeschifffahrt eingeschlossen ist.

**Abbildung 3: CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Wirtschaftszweigen für das Jahr 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022b; eigene Berechnung

Innerhalb des verarbeitenden Gewerbes ist es die Metallerzeugung und -bearbeitung und darunter insbesondere die Stahlherstellung (WZ 24.1; vgl. Kapitel 2.6), welche die meisten Emissionen freisetzen – gefolgt von Herstellung von Glaswaren, Keramik und Verarbeitung von Steinen und Erden. Wobei insbesondere die Zementindustrie (WZ 23.5; vgl. Kapitel 2.5) und die Glasindustrie (WZ 23.1; vgl.

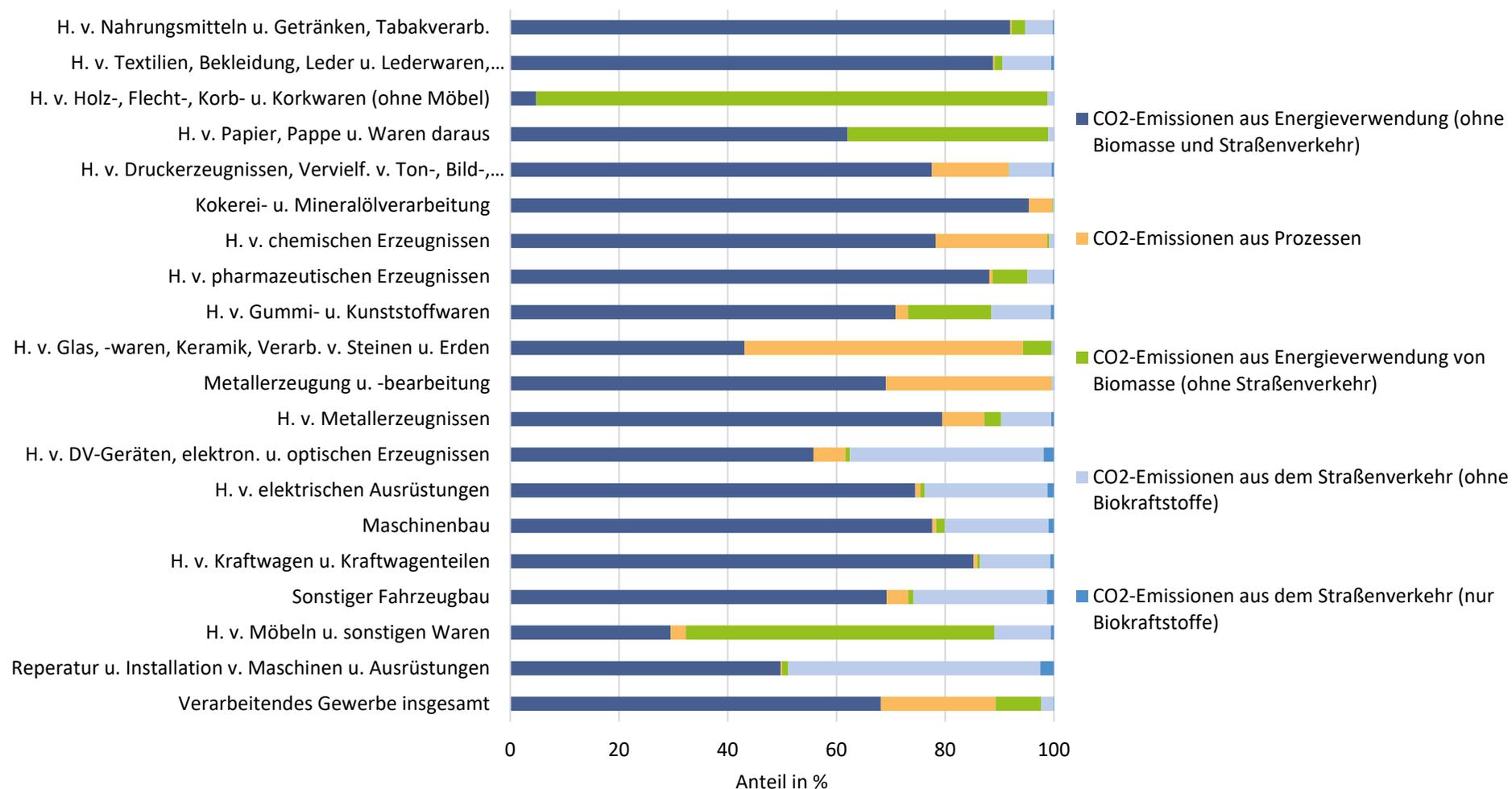
Kapitel 2.4) die Hauptverursacher sind. Dann folgt die Kokerei und Mineralölverarbeitung – wobei hier insbesondere die Raffinerien (WZ 19.2; vgl. Kapitel 2.2) die Hauptemittenten sind. Mit einem nahezu ähnlichen Emissionsanteil folgt die Chemieindustrie (vgl. Kapitel 2.3).

Die Fahrzeugindustrie ist kein Industriezweig, der besonders viele CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Produktion verursacht – dies wird in der Regel in den vorgelagerten Produktionsprozessen, insbesondere im Stahlbau, vollzogen. In der Darstellung in Abbildung 3 nicht miteinbezogen sind die Emissionen, die durch die Nutzung der hergestellten Kraftfahrzeuge verursacht werden, und zwar insbesondere im Individualverkehr (vgl. Kapitel 4). Diese Emissionen werden in der Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) nicht mehr den Wirtschaftszweigen, sondern dem Block der privaten Haushalte zugerechnet.

Die in Abbildung 3 ausgewiesenen CO<sub>2</sub>-Emissionen sind die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in einem Wirtschaftszweig, also CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Energieverwendung (ohne Biomasse und Straßenverkehr), Prozessen, Energieverwendung von Biomasse (ohne Straßenverkehr) sowie aus dem Straßenverkehr ohne Biokraftstoffe und dem Straßenverkehr mit ausschließlich Biokraftstoffen. Für das Jahr 2019 zeigt Abbildung 4 den Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Verursachungstyp.

Für das gesamte verarbeitende Gewerbe gilt, dass gut zwei Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energieverwendung (ohne Biomasse und Straßenverkehr) stammen. Zu 21 Prozent wird CO<sub>2</sub> prozessbedingt freigesetzt. Emissionen aus dem Straßenverkehr (2 Prozent) und aus der Verwendung von Biomasse (9 Prozent) haben nur einen geringen Beitrag. Allerdings gibt es je nach Wirtschaftszweig große Unterschiede. Die anteilig höchsten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen fallen bei der Kokerei und Mineralölindustrie (WZ 19), der Nahrungs-, Getränke- und Tabakindustrie (WZ 10–12) und bei den Textil- und Bekleidungsherstellern (WZ 13–15) an, gleichwohl keiner dieser Wirtschaftszweige – mit Ausnahme der Kokerei und Mineralölindustrie – zu den absolut größten Emittenten des verarbeitenden Gewerbes gehören. Dagegen sind die prozessbedingten Emissionen mit jeweiligen Anteilen von 21, 31 und 51 Prozent insbesondere bei den energie- und CO<sub>2</sub>-Emissionsintensiven Industrien Chemie (WZ 20), Metallerzeugung und -bearbeitung (WZ 24) und Herstellung von Glas, -waren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (WZ 23) überdurchschnittlich hoch. Im folgenden Kapitel werden verschiedene Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes insbesondere auf ihr Potenzial, ihre Emissionen mittels grünen Wasserstoffs zu reduzieren, untersucht.

**Abbildung 4: Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Verursachungstyp und nach Wirtschaftszweigen im verarbeitenden Gewerbe, 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022b; eigene Berechnung

## 2 Verarbeitendes Gewerbe

### 2.1 Papierindustrie (WZ 17)

Diese Abteilung umfasst die Herstellung von Holz- und Zellstoff und veredelten Papiererzeugnissen. Zusammengefasst wird die Herstellung dieser Erzeugnisse, da sie eine Reihe von vertikal verbundenen Verfahren bildet. In einer Einheit werden häufig mehrere Verfahren durchgeführt. Auch die Herstellung von bedruckten Papiererzeugnissen (z. B. Tapeten, Geschenkpapier usw.) gehört zur Branche, sofern das Drucken von Informationen nicht der primäre Zweck ist. Die Branche gliedert sich in die Produktion von Holz- und Zellstoff, Papier, Karton und Pappe (17.1) sowie die Herstellung von weiterverarbeitetem Papier und Papiererzeugnissen (17.2) (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 221).

#### 2.1.1 Produktionsprozesse

Der Endenergieverbrauch der Branche ist hoch. 2019 wurde für die Papierproduktion 209 615 TJ an Primär- und Sekundärenergie verbraucht, was 8 Prozent des Endenergieverbrauches des verarbeitenden Gewerbes entspricht. 35 Prozent des Endenergieverbrauchs ist Erdgas und circa 9 Prozent des gesamten Erdgasbedarfes des verarbeitenden Gewerbes geht auf die Papierindustrie zurück (vgl. AG ENERGIEBILANZEN 2023).

In der Papierindustrie wird der zum Betrieb der Maschinen benötigte Strom in der Regel in eigenen Gaskraftwerken aus Erdgas gewonnen. Erdgas wird darüber hinaus auch für die Erzeugung von Dampf verwendet, der beispielsweise für das Altpapierrecycling, die Trocknungsverfahren von Papier, in Zellstofffabriken sowie bei der Rückgewinnung von Chemikalien benötigt wird.

Optionen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Papierindustrie umfassen die Elektrifizierung der Prozesse sowie die Nutzung von Wasserstoff – sowohl in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) als auch in speziellen Trocknungsverfahren (BMWK 2022a, S. 6). Bei der Dampferzeugung könnte Wasserstoff das Erdgas ersetzen. Voraussetzung wäre, dass die Gasturbine für die Wasserstoffverbrennung genutzt werden kann. Zum Teil sind diese zwar bereits „H<sub>2</sub>-ready“, für eine reine Wasserstoffnutzung benötigt es jedoch neue Brenner-Technologien. Der Technologie-Reifegrad ist dabei hoch, sodass neue Investitionen für die Umrüstung der Prozesse notwendig sind (NEUWIRTH u. a. 2022).

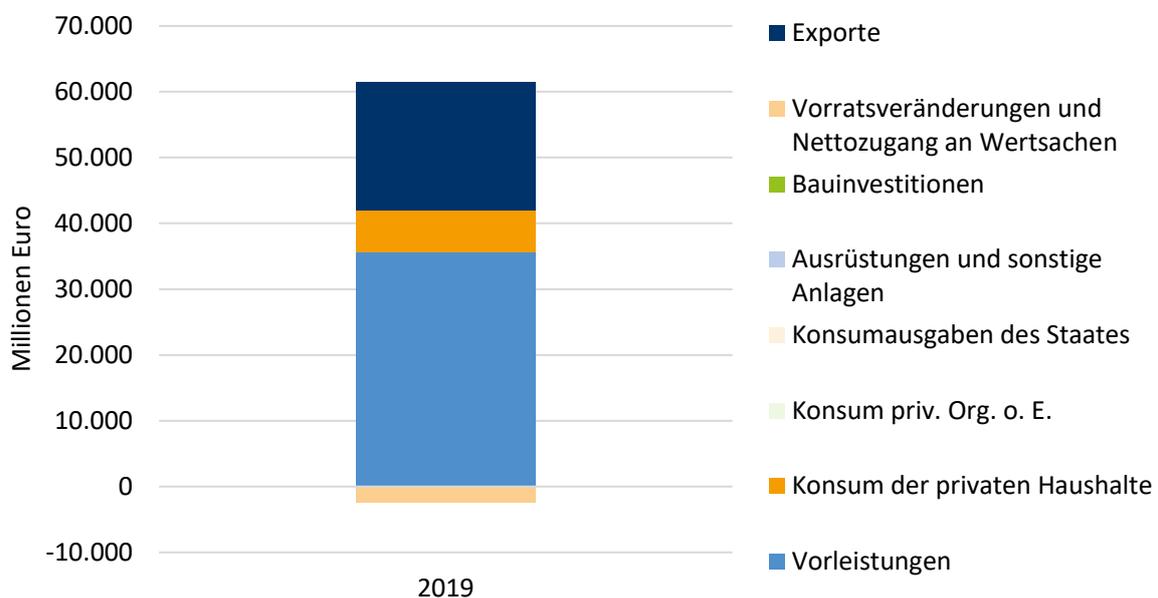
Gegen eine Wasserstoffnutzung sprechen die mit 80–220 °C eher niedrigen benötigten Temperaturen in der Papierindustrie. Vor allem im Hinblick auf das voraussichtlich knappe Angebot an grünem Wasserstoff ist die Elektrifizierung vermutlich die dominierende Dekarbonisierungsstrategie der Branche (BMWK 2022a, S. 10). Ferner würde sich bei der Papierindustrie auch die Frage der Versorgung mit grünem Wasserstoff stellen. Die Branche ist dezentral über ganz Deutschland verteilt. Es existieren

im Vergleich zu anderen Industrien viele eher kleine Produktionsstätten, was Anschlüsse an ein Pipelinenetz kompliziert machen könnte (NEUWIRTH u. a. 2022).

### 2.1.2 Nachfrage- und Kostenstruktur

Die Papierindustrie stellt hauptsächlich Export- und Vorleistungsgüter her, wobei der Schwerpunkt eindeutig bei den Vorleistungsgütern (60 Prozent) liegt. Damit gehen die Produkte zu fast zwei Dritteln in die Produktion anderer Wirtschaftszweige ein. Nur ein geringer Anteil der Gesamtverwendung wird von den privaten Haushalten (11 Prozent) konsumiert (vgl. Abbildung 5).

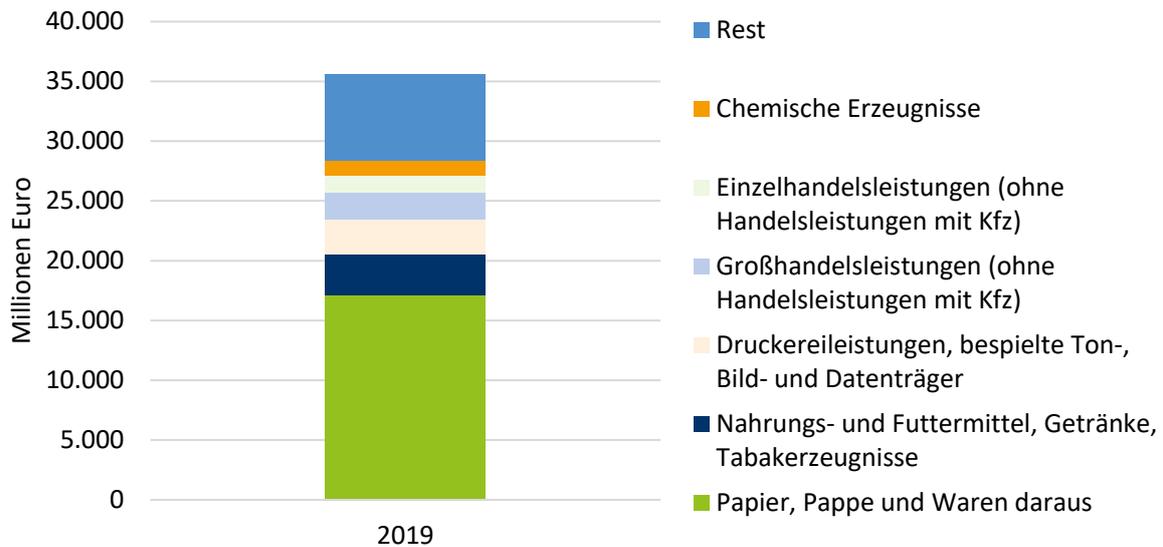
**Abbildung 5: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Papierindustrie (WZ 17) nach Verwendungskomponenten, 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die sechs größten Abnehmerbranchen von Vorleistungsgütern sind in Abbildung 6 dargestellt. Den größten Posten bilden die In-Sich-Lieferungen. Der wichtigste branchenexterne Abnehmer ist wiederum die Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie, welche Papier- und Pappprodukte vornehmlich für die Verpackung ihrer eigenen Waren nutzt. Die Druckereibranche (WZ 18) folgt als nächster bedeutender Nachfrager. Neben dem Groß- und Einzelhandel ist auch die Chemieindustrie ein bedeutender Nachfrager von Papier, Pappe und Waren daraus.

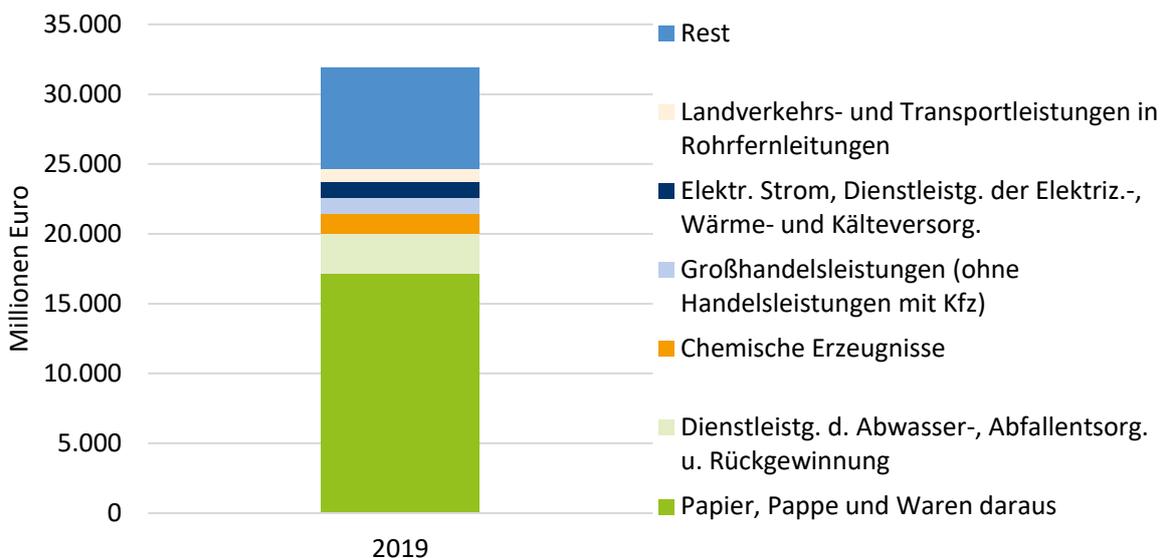
**Abbildung 6: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen der Papierindustrie (WZ 17), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die Kostenstruktur ist in Abbildung 7 abgebildet. Auch hier zeigt sich, dass die größten Aufwendungen bei dem Bezug von Waren innerhalb der eigenen Branche entstehen. Externe Kosten entstehen durch die Abwasser- und Abfallentsorgung sowie durch den Bezug von chemischen Erzeugnissen. Daneben ist elektrischer Strom, Wärme- und Kälteversorgung ein wichtiger Kostenblock.

**Abbildung 7: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Papierindustrie (WZ 17), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

### 2.1.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Der geschätzte Wasserstoffbedarf aus Drittquellen sieht sehr einheitlich einen nur geringen, langfristigen Wasserstoffbedarf in der Papierindustrie. Bis 2045 wird vom Branchenverband der Papierindustrie ein Bedarf von bis zu 6 TWh gesehen – in anderen Schätzungen wird von einem deutlich niedriger Wasserstoffbedarf ausgegangen.

**Tabelle 1: Geschätzter Wasserstoffbedarf Papierindustrie**

Zeitraum	Menge	Quelle
2045	2 TWh	ENERGIEWIRTSCHAFTLICHES INSTITUT AN DER UNIVERSITÄT ZU KÖLN 2021
2045	2 TWh	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI 2022
2045	3–6 TWh	BMWK 2022a

### 2.1.4 Fazit

Obwohl eine Wasserstoffnutzung in der Papierindustrie technisch vergleichsweise unkompliziert wäre, wird Wasserstoff voraussichtlich – wenn überhaupt – nur zu einem geringen Teil für die Dekarbonisierung der Branche eingesetzt. Da die Branche im Niedrig- und Mitteltemperaturbereich arbeitet, ist die Elektrifizierungsrouten hier der wahrscheinlichste Weg zur Dekarbonisierung. Dies bestätigen auch die niedrigen Bedarfsprojektionen für die Branche.

Langfristig steigt der Kostenfaktor „Strom“ durch die Dekarbonisierung deutlich an, während der Kostenfaktor Erdgas sinkt und die Nachfragestruktur unverändert bleibt.

## 2.2 Kokerei und Mineralölverarbeitung (WZ 19)

Die Kokerei und Mineralölverarbeitung umfasst die Verarbeitung von Rohöl und Kohle zu gebrauchsfertigen Erzeugnissen, wobei das vorherrschende Verfahren in der Mineralölverarbeitung die Trennung von unbehandeltem Erdöl in Teilerzeugnisse durch Spaltung oder Destillation ist. Erdölraffinerien produzieren neben Produkten wie Diesel, Benzin, Kerosin und Heizöl auch Gase wie Ethan, Propan und Butan (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 228).

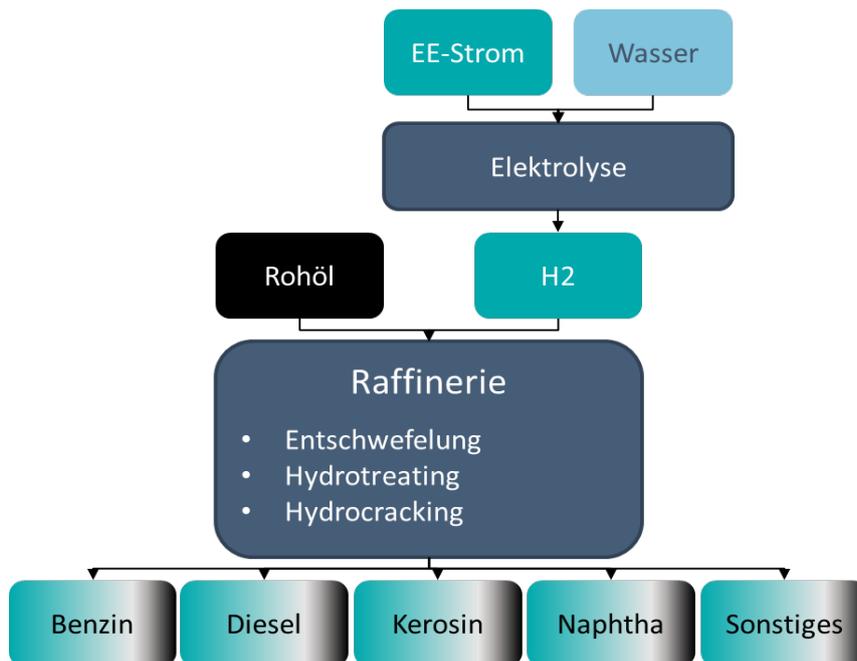
### 2.2.1 Produktionsprozesse

Wasserstoff wird von Erdölraffinerien bereits heute für die Herstellung von Benzin, Diesel, Kerosin oder Paraffinen benötigt. Eingesetzt wird er etwa nach dem Cracken/Spalten von langkettigen Kohlenwasserstoffen, beim Sättigen der Kohlenstoffbindungen oder bei der Entschwefelung Umweltbundesamt (2023). Circa 60 Prozent des insgesamt benötigten Wasserstoffes wird raffinerieintern aus den Prozessschritten gewonnen. Die restlichen 40 Prozent müssen extern zugeführt werden. Gemäß Umweltbundesamt (2023) entsprechen diese 40 Prozent derzeit rund 177 000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr, was umgerechnet circa 6 TWh an Wasserstoff entspricht. Würden diese 6 TWh Wasserstoff grün hergestellt werden, kämen über ein Fünftel der im Jahr 2030 anvisierten Wasserstoffproduktionskapazität von 10 GW allein für den Ersatz des grauen Wasserstoffes durch grünen Wasserstoff in Erdölraffinerien zum Einsatz. Allerdings variiert der Wasserstoffbedarf in Abhängigkeit der Beschaffenheit des Rohöls und der Menge der jeweiligen Endprodukte (UMWELTBUNDESAMT 2023).

Der externe Wasserstoffbedarf wird bislang aus der Dampfreformierung von Erdgas gewonnen (vgl. Kapitel 2.3.1.1), womit der Herstellungsprozess für Erdölprodukte vollständig auf fossil erzeugtem Wasserstoff beruht. Würde Wasserstoff stattdessen aus erneuerbaren Energien via Elektrolyse hergestellt werden würde eine deutliche Menge an Treibhausgasen eingespart werden können (vgl. Abbildung 8). Wenn also die Raffinerien auf grünen Wasserstoff umrüsten würden, könnten Erdölprodukte emissionsärmer hergestellt werden und somit auch zur Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßen-, Flug- und Schiffverkehrs beitragen.

Aufgrund der Dekarbonisierung und Elektrifizierung der gesamten Wirtschaft könnte das Geschäftsmodell für Raffinerien langfristig gefährdet sein. Und zwar dann, wenn weder fossile Brennstoffe für den Verkehrssektor (vgl. Kapitel 4) noch Naphtha für die Chemieindustrie (vgl. Kapitel 2.3) benötigt werden.

**Abbildung 8: Raffinerieproduktion mit grünem Wasserstoff**

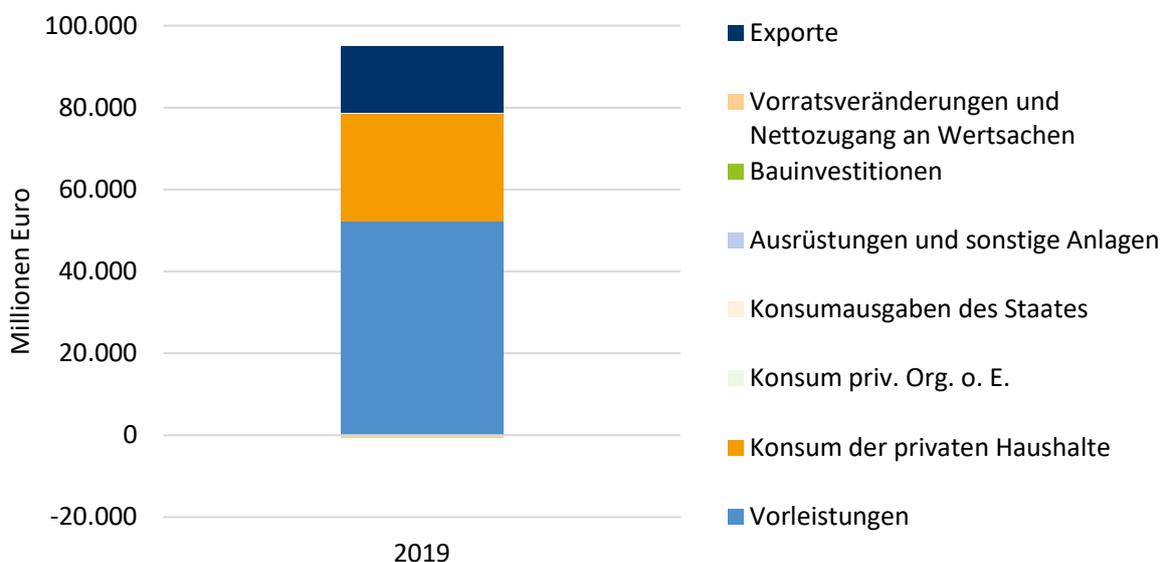


Quelle: eigene Darstellung; angelehnt an von GERSDORFF 2018

### 2.2.2 Nachfrage- und Kostenstruktur

Die Produkte der Raffineriebranche werden zum einen als Vorleistungen für die Produktion und Bereitstellung weiterer Güter und Dienstleistungen (55 Prozent der gesamten Verwendung) verwendet oder von den privaten Haushalten (28 Prozent) nachgefragt und zum anderen als Exportgut (17 Prozent) ins Ausland verkauft (vgl. Abbildung 9). Der Großteil der privaten Nachfrage wird in Form von Kraftstoffen als Benzin und Diesel nachgefragt.

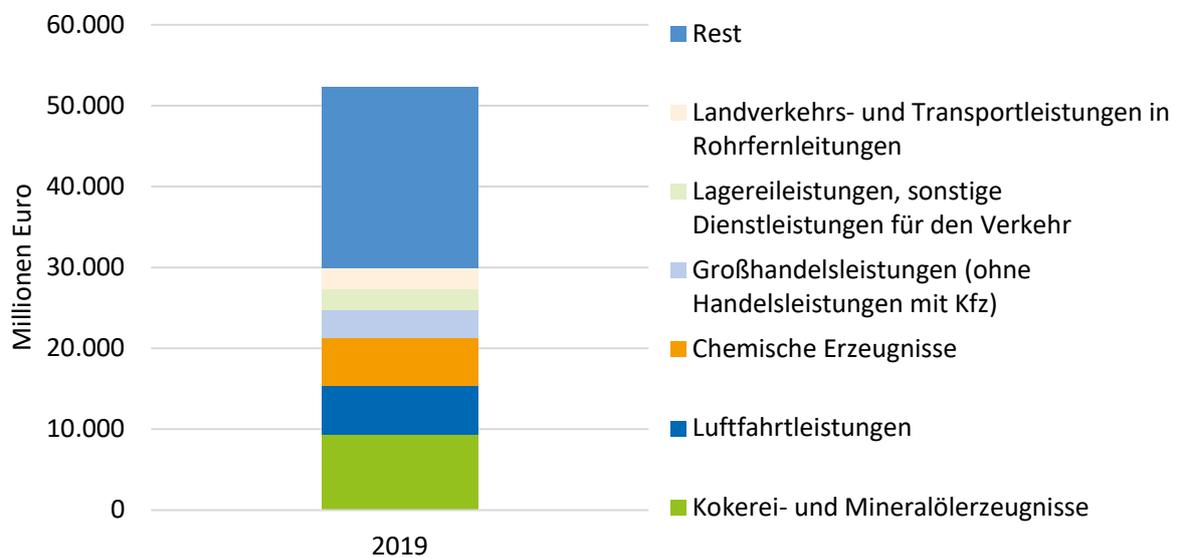
**Abbildung 9: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Kokerei und Mineralölindustrie (WZ 19) nach Verwendungskomponenten, 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die Vorleistungsnachfrage macht 55 Prozent der gesamten Verwendung aus und wird zu fast 60 Prozent von sechs Produktionsbereichen nachgefragt (vgl. Abbildung 10). Die meisten dieser Vorleistungslieferungen werden für die Weiterverarbeitung im eigenen Produktionsbereich benötigt (18 Prozent). Dem folgt die Luftfahrtbranche, die das in den Raffinerien hergestellte Kerosin abnimmt (12 Prozent) und die Chemieindustrie (11 Prozent), die der Abnehmer für Naphtha bzw. die daraus gewonnenen Aromaten und Olefine ist. Es folgen Großhandelsleistungen (7 Prozent), welche für den Weitertransport der Kraftstoffe an bspw. Tankstellen sorgen. Mit jeweils 5 Prozent tritt die Transportbranche als wichtiger Abnehmer für Diesel im Lkw-Betrieb an.

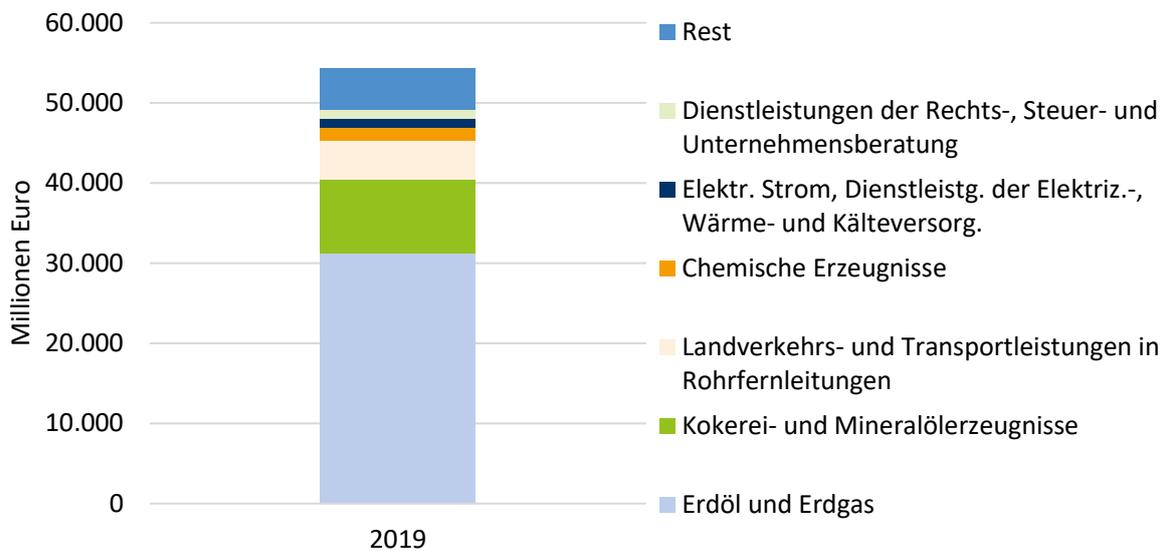
**Abbildung 10: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von Kokerei und Mineralölprodukten (WZ 19), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die Kostenstruktur für die Kokerei und Mineralölbranche ist in Abbildung 11 wiedergegeben. Demnach ist der größte Posten der Ankauf von Erdöl und Erdgas (57 Prozent). Dem folgen Kokerei- und Mineralölerzeugnisse aus der eigenen Branche (17 Prozent) sowie die Kosten für den An- und Abtransport von Erdöl und Erdgas bzw. Kokerei- und Mineralölerzeugnissen via Pipelines oder anderer Transportmittel des Landverkehrs (9 Prozent). Weiter benötigt die Branche für ihre Produktion Erzeugnisse aus der Chemie (3 Prozent), die für bestimmte Raffinerieprozesse notwendig sind – wie bspw. auch der Einkauf von in der Chemieindustrie hergestelltem Wasserstoff. Strom, Wärme und Kühlung wird ebenfalls für die Produktion benötigt (2 Prozent).

**Abbildung 11: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Kokerei und Mineralölindustrie (WZ 19), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

### 2.2.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Es liegen nicht viele Quellen zur Einschätzung des zukünftigen Wasserstoffbedarfes vor. Bis 2030 wird ein zusätzlicher Bedarf von 3 TWh gesehen. Dazu kommt die Substitution von heute auf erdgasbasierten Wasserstoff durch grünen Wasserstoff (NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2023, S. 7).

**Tabelle 2: Geschätzter Wasserstoffbedarf der Kokerei und Mineralölverarbeitung**

Zeitraum	Menge	Quelle
2030	3 TWh	NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2023, S. 11

### 2.2.4 Fazit

Da Wasserstoff für die Herstellung von Treibstoffen und anderen raffinierten fossilen Produkten benötigt wird, ist die Umstellung von fossilen auf grünen Wasserstoff technisch kein Problem. Auch die Umrüstung ist unkompliziert, da Wasserstoff bereits bei Raffinerieprodukten Anwendung findet. Im Falle einer Selbstversorgung würden Investitions- und Betriebskosten für Elektrolyseure anfallen.

Langfristig dürfte sich das bestehende Geschäft der Industrie deutlich verkleinern und sich die Nachfragestruktur der Branche damit merklich ändern. Durch die Elektrifizierung des Individualverkehrs würde die Benzin/Diesel-Herstellung langfristig immer weiter abnehmen. Auch die Nachfrage nach fossilem Naphtha dürfte bei einer konsequenten Dekarbonisierungsstrategie der Chemieindustrie deutlich sinken. Inwieweit eine kompensierende Nachfrage durch die Herstellung von Bio- und E-Fuels sowie synthetischem Naphtha entsteht, ist bislang jedoch noch fraglich.

Die Nachfrage nach Kraftstoffen für den Flug- und Schiffsverkehr dürfte nahezu unverändert bleiben und mit der Entwicklung der beiden Mobilitätsbranchen schwanken. Sollte der Luftverkehr langfristig abnehmen, wäre auch hier die Gefahr einer abschwächenden Nachfrage gegeben. Die Beimischungsquoten von E-Fuels in Kerosin und die CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele im Schiffsverkehr sind für die Branche ein Anlass, auch in die synthetische Treibstoffproduktion einzusteigen.

## 2.3 Herstellung von chemischen Erzeugnissen (WZ 20)

Die Chemieindustrie umfasst die Produktion von chemischen Erzeugnissen mittels chemischer Verfahren aus organischen und anorganischen Rohstoffen. Dabei wird innerhalb der Branche zwischen der Grundstoffchemie (WZ 20.1), zu der auch die Herstellung von Industriegasen zählt, sowie der Weiterverarbeitung dieser Grundstoffe zu Zwischen- und Endprodukten unterschieden (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 230).

### 2.3.1 Produktionsprozesse

Der Endenergieverbrauch der Branche ist hoch. 2019 hat die Grundstoffchemie 521.779 TJ an Primär- und Sekundärenergie verbraucht, was am gesamten Endenergieverbrauch über alle in der Energiebilanz ausgewiesenen Sektoren des verarbeitenden Gewerbes den zweithöchsten Wert nach der Metallerzeugung bedeutet. Der Hauptenergieträger ist für die Grundstoffchemie mit einem Anteil von rund 36 Prozent Erdgas. Allerdings verzeichnet die Branche auch den höchsten Mineralölbedarf im verarbeitenden Gewerbe. Mineralölprodukte – vor allem Raffineriegas – machen 8 Prozent des Endenergieverbrauchs aus. Darüber hinaus hat die sonstige chemische Industrie im Jahr 2019 insgesamt 83 855 TJ Energie verbraucht. Hier ist jedoch auch der Endenergieverbrauch der Pharmaindustrie enthalten, die in der Energiebilanz nicht getrennt ausgewiesen wird. Zusammen genommen entsprechen die 605 634 TJ einem Endenergieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes von 24 Prozent. Circa 28 Prozent des gesamten Erdgasbedarfes des verarbeitenden Gewerbes geht auf die Chemieindustrie zurück (AG ENERGIEBILANZEN 2023).

Die Chemieindustrie hat bereits heute einen hohen Wasserstoffbedarf. Im Jahr 2021 lag der Wasserstoffbedarf vor allem für die stoffliche Nutzung bei 1,1 Mio. Tonnen bzw. 37 TWh (NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2021). Allein die BASF in Ludwigshafen produziert rund 250 000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr (ca. 8 TWh) (BASF 2023b). Wasserstoff wird bislang hauptsächlich stofflich verwendet. Als Energieträger findet er heutzutage kaum Einsatz. Er dient als Ausgangsmaterial für die Herstellung von sogenannten Basischemikalien. Das Gas ist wichtiger Rohstoff für die Ammoniakproduktion und ist in vielen anderen Produkten wie Kaugummi oder Kunststoffen enthalten. In der Regel wird Wasserstoff mittels einer Dampfreformierung und unter Verwendung von Erdgas hergestellt.

Die Dekarbonisierung der Chemieindustrie verlangt den Ersatz des heute hauptsächlich stofflich verwendeten grauen Wasserstoffes durch grünen Wasserstoff. Die hohe Energieintensität der Branche

sowie ihr hoher Einsatz von Erdgas als Energieträger erfordert aber auch dessen Substitution. Grüner Wasserstoff kann vermehrt als Ersatz für Erdgas in energetischen Prozessen eingesetzt werden.

In der Chemieindustrie müssen unterschiedliche Prozesse umstrukturiert werden, damit diese Industrie klimaneutral werden kann. Dabei sind unterschiedliche Methoden und Verfahren notwendig. Die wichtigsten drei Prozesse – die Dampfreformierung, das Steamcracking und die Ammoniaksynthese – sind im Folgenden näher beschrieben.

#### 2.3.1.1 Dampfreformierung

Die Dampfreformierung ist das aktuell bedeutendste industrielle Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff. Wasserstoff wird dabei aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern hergestellt. Erdgas ist dabei der wichtigste Rohstoff. Aber auch Methanol, Leichtbenzin, Biogas oder Biomasse und Wasser können Ausgangsprodukte sein.

Bei einer Dampfreformierung wird der Ausgangsstoff mit Wasserdampf bei hoher Temperatur (450 bis 500 Grad Celsius) und Druck (25 bis 30 bar) angereichert. Das Gemisch wird bei ähnlichem Druck und doppelt so hohen Temperaturen (800 und 900 Grad Celsius) zu reinem Wasserstoff umgewandelt. Nebenprodukte wie Kohlenmonoxid, Kohlendioxid oder Methan werden herausgefiltert. Der Wirkungsgrad – also das Verhältnis zwischen zugeführter Energie und nutzbarer Energie – der Wasserstoff Dampfreformierung liegt bei etwa 60 bis 70 Prozent (SFC ENERGY 2023).

Der durch Dampfreformierung auf Basis von Erdgas gewonnene Wasserstoff wird grauer Wasserstoff genannt. Der Energiegehalt des Wasserstoffes übersteigt den des eingesetzten Brennstoffes. Im Produktionsprozess werden allerdings hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen freigesetzt (etwa 9 bis 10 Tonnen CO<sub>2</sub> je Tonne Wasserstoff). Damit gehört die Wasserstoffproduktion zu den größten CO<sub>2</sub>-Emittenten in der Chemieindustrie (SFC ENERGY 2023).

Zwei alternative Verfahren zur Dampfreformierung können zur Gewinnung von Wasserstoff herangezogen werden:

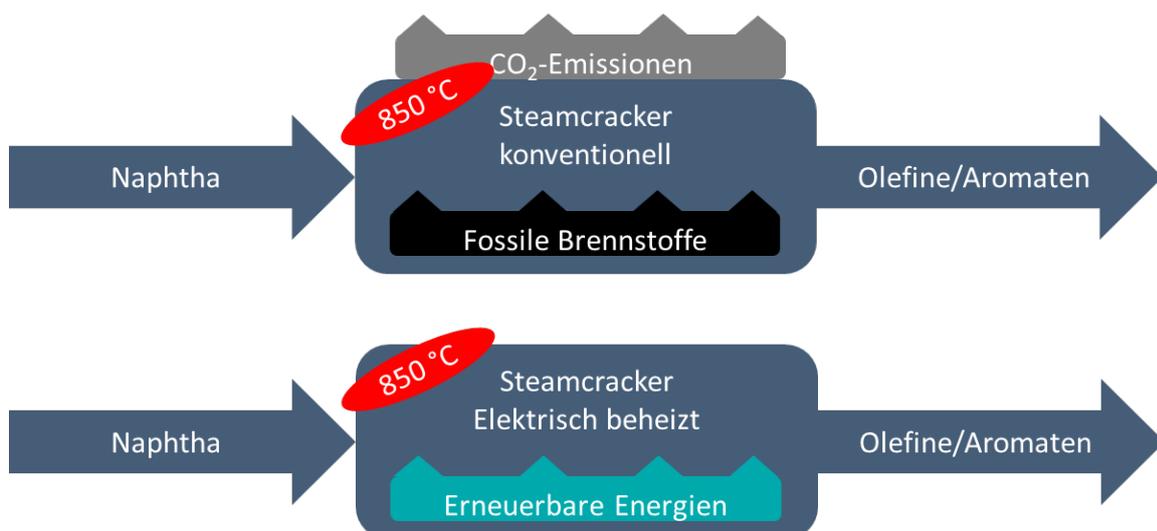
- **Wasserelektrolyse:** Die Wasserelektrolyse spaltet Wasser mithilfe von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff. Wird der eingesetzte Strom durch erneuerbare Energiequellen gewonnen, wird der so gewonnene Wasserstoff auch grüner Wasserstoff genannt. Der Ersatz der Dampfreformierung durch Elektrolyse bedeutet den Aufbau der Elektrolyseure und das Abschalten der Dampfreformierer.
- **Methanpyrolyse:** Die Methanpyrolyse spaltet Erdgas oder Biomethan in seine Bestandteile Wasserstoff und Kohlenstoff auf. Wird das Methan aus Erdgas verwendet, wird auch von türkischem Wasserstoff gesprochen. Der Kohlenstoff fällt als Nebenprodukt in fester Form an, wodurch keine CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen. Für die Methanpyrolyse werden hohe Temperaturen über 1000 Grad Celsius benötigt. Die Wärmeenergie kann mit Strom erzeugt werden. Der Stromverbrauch ist dabei deutlich geringer als bei der Elektrolyse.

### 2.3.1.2 Steamcracking

Mittels Steamcracker werden High-Value-Chemicals (HVC) wie Olefine und Aromate hergestellt, die in vielen Produkten der Chemieindustrie Verwendung finden. Durch den Steamcracker werden langkettige Kohlenwasserstoffe (z. B. Naphtha, Ethan, Propan oder Butan) in kurzkettige oder ungesättigte Kohlenwasserstoffe gespalten (NEUWIRTH u. a. 2022; GERES u. a. 2019; AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2020). Die in Deutschland betriebenen Steamcracker können bis zu 5,5 Mio. Tonnen Ethen pro Jahr produzieren und stoßen dabei 3,8 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> aus (SCHEUERMANN 2021). Dabei wird vor allem Naphtha als Rohstoff eingesetzt. Der Spaltprozess wird in einem Rohrreaktor bei hoher Temperatur (800 bis 850 °C) durchgeführt. Die Rohrschlangen eines Steamcrackers können dabei bis zu 80 m lang sein. Die Beheizung der Rohre erfolgt durch einen Ofen. 90 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen eines Steamcrackers entfallen auf die Beheizung dieses Spaltofens (SCHEUERMANN 2021).

Mit der Beheizung des Spaltofens mittels grünem Strom oder mittels grünem Wasserstoff kann ein Großteil der Emissionen eines Steamcrackers reduziert werden. Die Technologien für einen elektrisch beheizten Steamcracker sind derzeit noch in Pilotphasen, aber verschiedene Kooperationspartner (Dow/Shell oder BASF/Sabic/Linde) forschen daran (SCHEUERMANN 2021). 2022 hat bspw. die BASF Ludwigshafen mit dem Bau einer Demonstrationsanlage für großtechnische elektrisch beheizte Steamcracker-Öfen begonnen (NONNAST 2022). Abbildung 12 verdeutlicht den Unterschied zwischen dem konventionellen und dem elektrischen Cracking.

**Abbildung 12: Konventionelles und elektrisches Steamcracking-Verfahren**



Quelle: eigene Darstellung

In Deutschland sind aktuell zehn Steamcracker im Einsatz – zum Vergleich: In der EU27 und dem Vereinigten Königreich laufen rund 50 Steamcracker von zwanzig Unternehmen (FRANCKE 2021).

HVC können in der Primärproduktion hergestellt werden (durch Naphtha) oder in der Sekundärproduktion durch Recycling von Kunststoffen. Wenn immer weniger Naphtha in den Raffinerien (vgl. Kapitel 2.2) hergestellt wird, so gewinnt die Sekundärroute über Recycling von Kunststoffen für die Chemieindustrie deutlich an Bedeutung.

Werden die Investitionsgelder der Demonstrationsanlage der BASF herangezogen (69 Mio. Euro (KZEITUNG 2022)) und auf die zehn Steamcracker in Deutschland angewendet, so würden für deren Umrüstung auf das elektrische Verfahren rund 690 Mio. Euro an Umrüstungskosten anfallen.

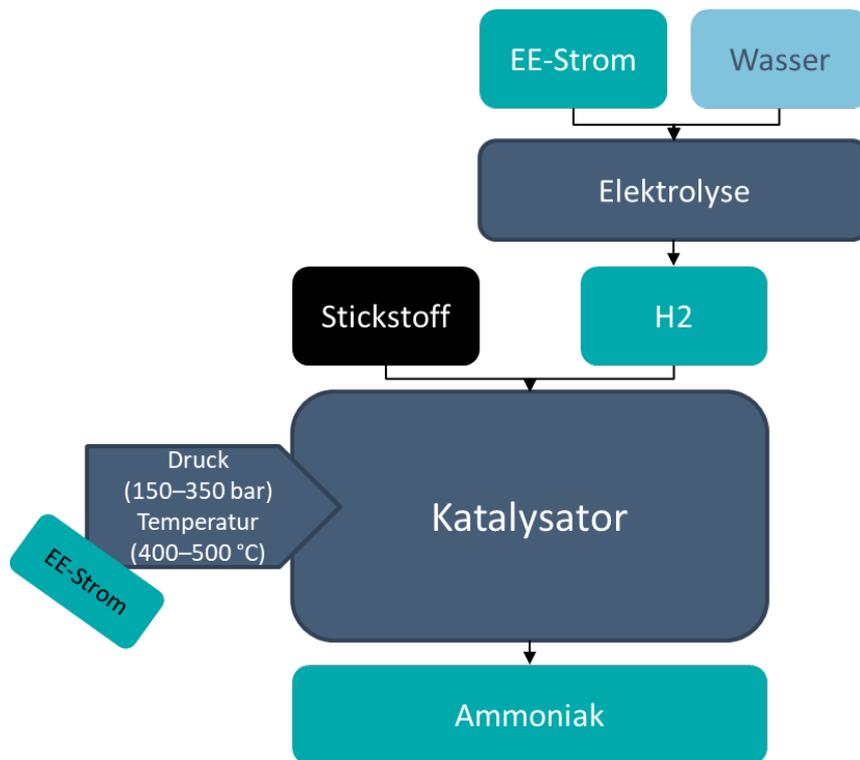
Daneben bestünde noch die Möglichkeit, den Steamcracking-Prozess in der Produktion von HVC komplett zu ersetzen und wasserstoffbasierte Produktionsprozesse zu etablieren. Dabei würde zuerst Methanol mithilfe von Wasserstoff als Zwischenprodukt hergestellt werden, welches anschließend zu Olefinen weiterverarbeitet werden könnte. Dafür würden sehr große Mengen an Methanol beziehungsweise Wasserstoff benötigt. Für die Herstellung einer Tonne Ethylen oder Propylen bedarf es 2,8 Tonnen Methanol. Der gesamte Energiebedarf im Vergleich zur konventionellen Produktionsroute wäre trotz eines hohen Technologiereifegrades rund fünfmal höher (NEUWIRTH u. a. 2022; GERES u. a. 2019).

#### 2.3.1.3 Ammoniaksynthese

Ammoniak ist ebenfalls ein wichtiges Grundprodukt der Chemieindustrie. Der Großteil wird zur Herstellung von Düngemittel genutzt, aber zur Produktion anderer Produkte wie Kunststoffe oder Synthesefasern (NEUWIRTH/FLEITER 2020). Bei der Ammoniaksynthese werden Wasserstoff und Stickstoff mithilfe eines Katalysators bei hoher Temperatur und hohem Druck zu Ammoniak umgesetzt.

Der Wasserstoff kommt bislang aus der Dampfreformierung (siehe oben), kann aber auch aus der Wasserelektrolyse generiert werden. In letzterem Fall müsste reiner Stickstoff separat bereitgestellt werden. Bei der Dampfreformierung entsteht dieser allerdings bereits im Prozess der Erdgasverbrennung. Eine CO<sub>2</sub>-Wäsche ist bei der Ammoniakherstellung mittels Elektrolyse nicht mehr notwendig. Wird der Katalysator mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben, kann grünes Ammoniak hergestellt werden. Hinsichtlich der Investitionskosten dieses Verfahrens ist die Elektrolyse der dominierende Faktor. Eine Produktion von Ammoniak durch Methanpyrolyse wäre wirtschaftlich nicht sinnvoll (GERES u. a. 2019).

Abbildung 13: Herstellung von grünem Ammoniak



Quelle: eigene Darstellung

In Deutschland gibt es bislang vier Ammoniakproduktionsstandorte. Neben BASF in Ludwigshafen stehen diese bei Yara in Brunsbüttel, bei Ineos in Köln und bei den Stickstoffwerken Piesteritz nahe Wittenberg (AGORA INDUSTRIE u. a. 2021, S. 34).

Ammoniak kann zukünftig auch eine Schlüsselrolle als grüner Treibstoff in der Schifffahrt zukommen. Auch wird es möglicherweise als Träger von grünem Wasserstoff aus dem Ausland Verwendung finden – insbesondere, da der Transport von reinem Wasserstoff bislang aus fernen Distanzen noch nicht kommerziell möglich ist. Wird aber grüner Wasserstoff mithilfe der Trägersubstanz Ammoniak nach Deutschland importiert, so könnte das importierte Ammoniak nach dessen Ankunft über Ammoniak-Cracker wieder in Wasserstoff umgewandelt werden. Eine erneute Umwandlung in Ammoniak im Inland erfordert hohe Energieeinsätze und wäre somit höchst ineffizient und unwirtschaftlich. Eine grüne Ammoniakproduktion wird somit aufgrund der höheren Gestehungskosten für erneuerbare Energien in Deutschland aller Voraussicht nach nicht überlebensfähig bzw. wettbewerbsfähig sein. Die Entscheidung der BASF, eine Ammoniakproduktionsanlage stillzulegen, scheint ein erstes Anzeichen für die Verlagerung von Produktionsprozessen zu sein (BASF 2023a).

**Abbildung 14: Mögliche Ammoniakproduktionskette**



Quelle: eigene Darstellung

#### 2.3.1.4 Methanol Synthese

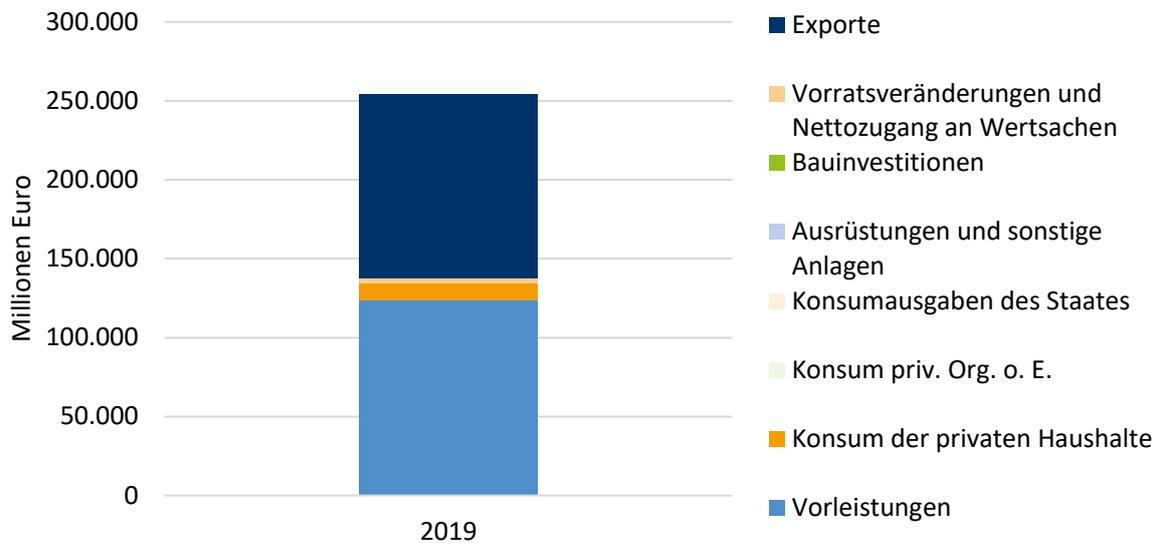
Methanol wird in der Chemieindustrie vor allem als Zwischenprodukt für verschiedene andere Industriechemikalien verwendet. Es besitzt sehr gute Verbrennungseigenschaften, wodurch es sich auch als Treibstoff im Mobilitätssektor eignet. Konventionell wird Methanol in Europa durch Synthese von Wasserstoff und Kohlenstoff hergestellt, wobei der Wasserstoff wie schon bei der Ammoniakherstellung aus der Dampfreformierung stammt (NEUWIRTH u. a. 2022; NEUWIRTH/FLEITER 2020). Eine Ausnahme bildet eine Anlage in Leuna, in der Methanol auf Basis von Schweröl durch Partialoxidation in sogenannten POX-Anlagen erzeugt wird. Diese Anlage produziert deutschlandweit die anteilig überwiegende Menge an Methanol (GERES u. a. 2019).

Somit könnte die Wasserstoffproduktion auch hier wie zuvor beschrieben auf Elektrolyse umgestellt werden. Der Elektrolyseur ersetzt in diesem Fall den Dampfreformer (bzw. die POX-Anlage). Der für die Methanolproduktion ebenfalls notwendige Kohlenstoff müsste dann allerdings aus externen Quellen zugeführt werden. Für eine klimaneutrale Produktion wäre hier Kohlenstoff aus Biomasse denkbar (GERES u. a. 2019). Alternativ könnten Kohlenstoff-Abscheidungs- und Verwendungsverfahren (CCU) genutzt oder Kohlenstoff aus der Luft mittels Direct-Air-Capture (DAC) gewonnen werden (AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2020).

#### 2.3.2 Nachfrage- und Kostenstruktur

Die Chemieindustrie stellt hauptsächlich Güter für die Weiterverarbeitung in anderen Produktionsprozessen (Vorleistungsgüter) oder Güter für den Export her. Nur sehr wenige Produkte werden für den Konsum privater Haushalte (bspw. Kosmetik oder Putzmittel) produziert. Mit 46 Prozent an der gesamten Verwendung ist der Exportanteil überdurchschnittlich hoch.

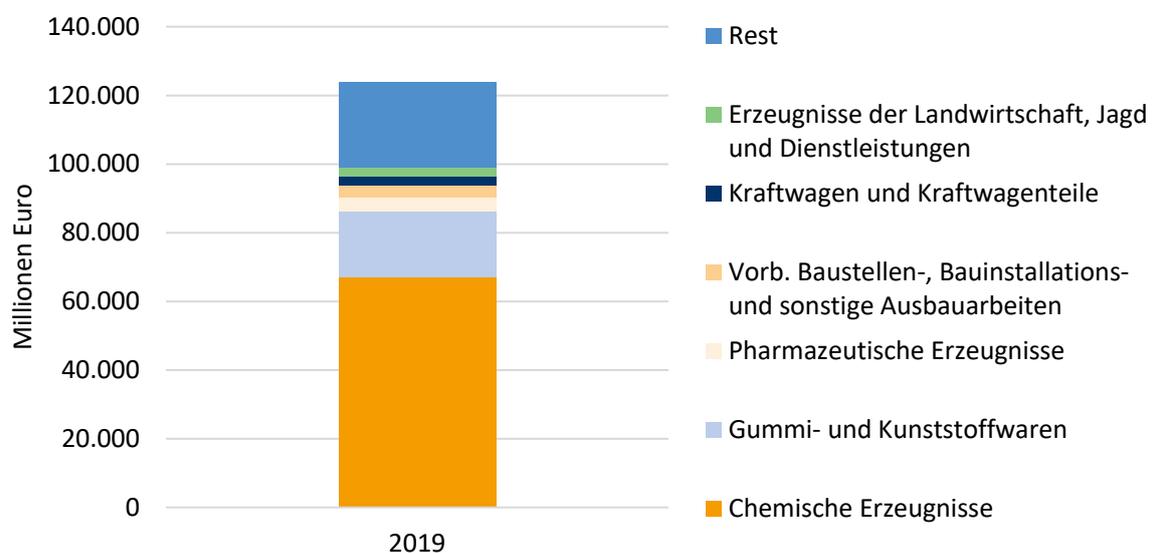
**Abbildung 15: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Chemieindustrie (WZ 20) nach Verwendungskomponenten, 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Der größte Abnehmer (vgl. Abbildung 16) von chemischen Erzeugnissen ist die Chemieindustrie selbst (54 Prozent). Dies liegt daran, dass viele Grundchemikalien (WZ 20.1) für die Weiterverarbeitung in weitere Produkte der Chemieindustrie eingehen – wie bspw. in Farben, Lacke, Düngemittel, Seifen oder Körperpflegemittel. Mit 16 Prozent ist jenseits der Chemieindustrie die Gummi- und Kunststoffindustrie der zweitwichtigste Abnehmer von chemischen Erzeugnissen, gefolgt von der Pharmaindustrie (3 Prozent). Mit jeweils 2 Prozent sind auch die Fahrzeugindustrie und die Landwirtschaft wichtige Kunden der Chemieindustrie.

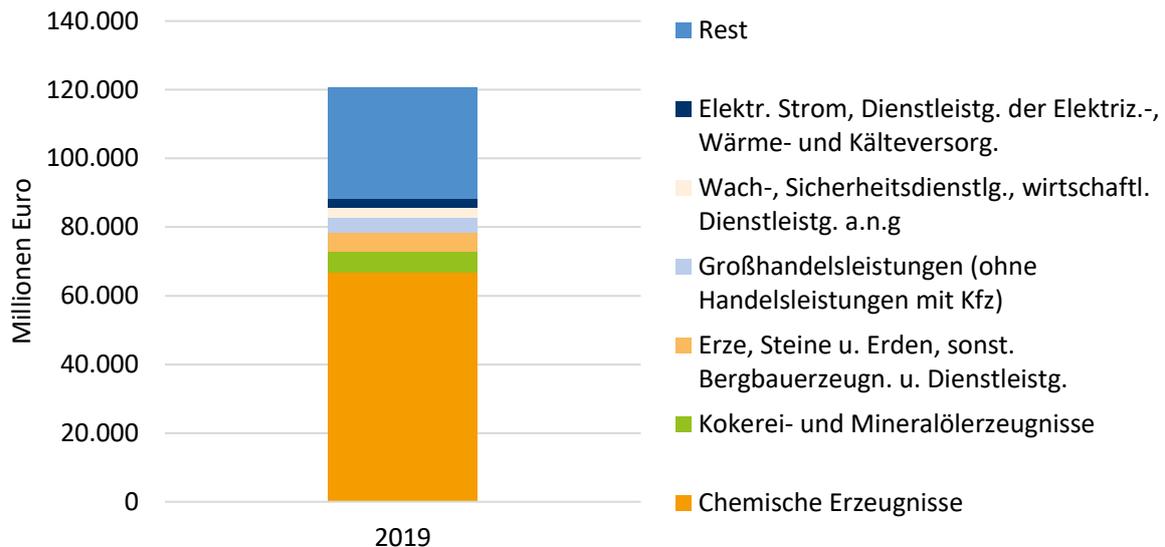
**Abbildung 16: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von chemischen Erzeugnissen (WZ 20), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Abbildung 17 zeigt die Kostenstruktur der Chemieindustrie auf. Die größten Aufwendungen werden branchenintern für den Zukauf von anderen chemischen Erzeugnissen aufgewendet (55 Prozent). Es folgen Kokerei- und Mineralölerzeugnisse (5 Prozent), aus denen der für die Chemieindustrie so wichtige Grundstoff Naphtha hergestellt wird (vgl. Kapitel 2.2). Strom, Wärme und Kühlung wird ebenfalls für die Produktion benötigt (2 Prozent).

**Abbildung 17: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Chemieindustrie (WZ 20), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

### 2.3.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Viele Quellen zur Einschätzung des zukünftigen Wasserstoffbedarfes sehen eine deutliche Steigerung des Bedarfes nach 2030. Bis 2030 dürfte voraussichtlich lediglich der Ersatz des grauen Wasserstoffes mit grünem Wasserstoff vollzogen worden sein, was in etwa der umgerechneten Größe eines heutigen Wasserstoffbedarfes in Höhe von 37 TWh aus Kapitel 2.3.1 entspricht. Der Bedarfsanstieg auf in der Regel deutlich über 200 TWh in der langen Frist kann daher nicht nur in der stofflichen Substitution von grauem durch grünen Wasserstoff herrühren. Hier wird grüner Wasserstoff auch in der Chemieindustrie zur Herstellung von synthetischem Naphtha oder Grundstoffen auf Methanol-Basis und als energetischer Einsatz insbesondere in Hochtemperaturprozessen notwendig sein.

**Tabelle 3: Geschätzter Wasserstoffbedarf der Chemieindustrie**

Zeitraum	Menge	Quelle
2030	36 TWh	NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2023, S. 11
2030	45 TWh	VERBAND DER CHEMISCHEN INDUSTRIE 2023, S. 56
2030	15 TWh	PROGNOS/ÖKO-INSTITUT/WUPPERTAL INSTITUT 2021
2045	283 TWh	VERBAND DER CHEMISCHEN INDUSTRIE 2023, S. 57
2045	201 TWh	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI 2022
2050	> 220 TWh	NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2021, S. 14
2040/2050	225 TWh	NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2023, 11

#### 2.3.4 Fazit

Für den Ersatz des Wasserstoffs aus Dampfreformierung durch grünen Wasserstoff aus Wasserelektrolyse bedarf es keinen weiteren Umbau in der Chemieindustrie, da Wasserstoff bereits im weiterführenden Produktionsprozess eingesetzt wird. Es bedarf hingegen des Abbaus der Dampfreformierungsanlagen und des Neubaus der Elektrolyseanlagen.

Für den Ersatz der konventionellen Steamcracker durch elektrisch beheizte Steamcracker können bestehende Anlagen umgerüstet werden. Die elektrischen Steamcracker können in die konventionellen Cracker eingebaut werden – insofern müssen die Anlagen nicht abgebaut werden. Steamcracker können auch wasserstoffbasiert laufen.

Bei der Ammoniaksynthese kann grüner Wasserstoff ebenfalls eingesetzt werden. Fraglich ist allerdings, ob die grüne Ammoniakproduktion in Deutschland überhaupt Bestand haben wird. Wahrscheinlicher ist es, dass die inländische Ammoniakproduktion abgebaut wird und der Import von Ammoniak deutlich zunimmt.

Bei der Herstellung von Methanol verhält es sich ähnlich wie bei der Herstellung von Ammoniak. Der notwendige Wasserstoff könnte statt durch Dampfreformierung beziehungsweise partielle Oxidation auch durch Elektrolyse bereitgestellt werden. Für ein klimaneutrales Produkt könnte der ebenfalls benötigte Kohlenstoff aus Biomasse, Industrie- oder Luftabscheidung stammen.

Die Nachfragestruktur bleibt für die Chemieindustrie zwar langfristig nahezu unverändert, allerdings dürfte sich die Kostenstruktur etwas ändern. Die Stromkosten legen sicherlich anteilig zu. Sollte die Chemieindustrie die Sekundärroute (Recycling von Kunststoff) zur Herstellung von HVC-Produkten wählen, verliert der Einkauf von Naphtha an Gewicht.

## 2.4 Glasindustrie (WZ 23.1)

Die Glasindustrie gehört zur Abteilung Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (WZ 23) und macht rund 29 Prozent am Umsatz aus (STATISTISCHES BUNDESAMT 2023a). Sie stellt damit den größten Bereich der Gesamtbranche dar. Sie umfasst die Herstellung von Glas und Erzeugnissen daraus (z. B. Flachglas, Hohlglas, Glasfasern, technische Glaswaren usw.) (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 245).

### 2.4.1 Produktionsprozess

Der Endenergieverbrauch der Glas- und Keramikbranche (WZ 23.1–23.4) ist im Vergleich zu anderen Branchen des verarbeitenden Gewerbes nicht sehr hoch. 2019 wurden für die Glas- und Keramikproduktion 81 928 TJ an Primär- und Sekundärenergie verbraucht. Dies entspricht 3,2 Prozent des Endenergieverbrauches des verarbeitenden Gewerbes. 76 Prozent des Endenergieverbrauchs ist Erdgas, womit 7,8 Prozent des gesamten Erdgasbedarfes des verarbeitenden Gewerbes auf diese Branchen zurückgeht (AG ENERGIEBILANZEN 2023). Besonders energieintensiv ist die Herstellung von Spezialglas, welches allerdings lediglich rund 14 Prozent des Umsatzes der Branche ausmacht. Der Großteil wird mit der Herstellung von Flachglas und Behälterglas erwirtschaftet (BV GLAS 2022).

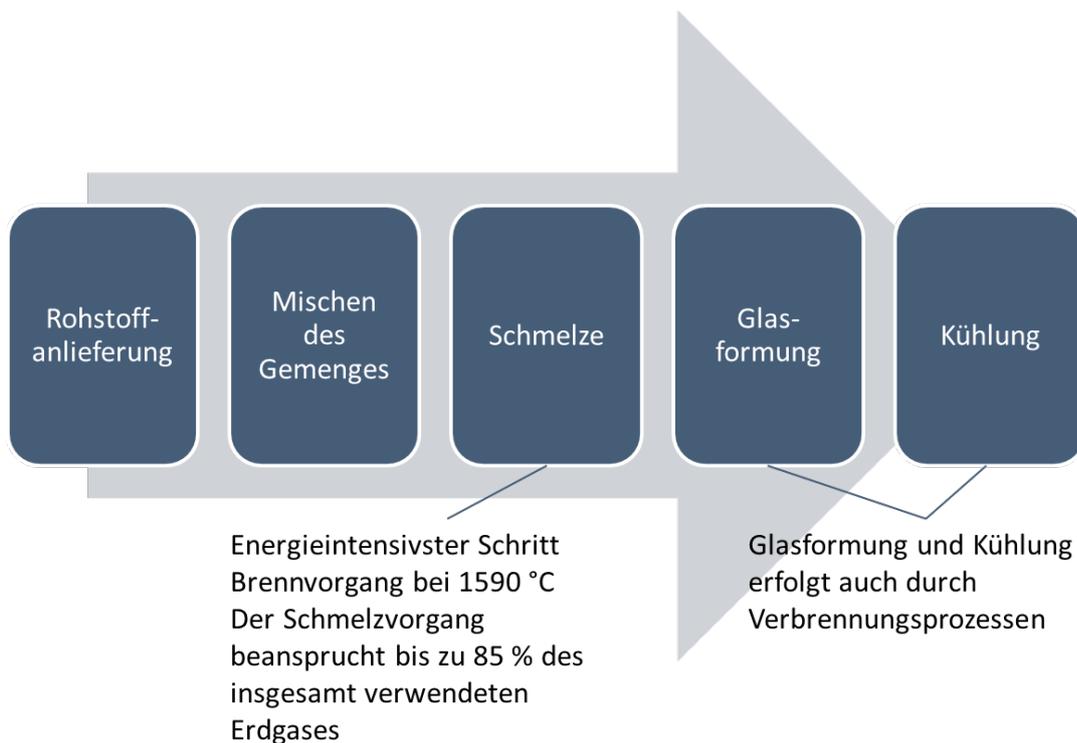
Mit ihrem hohen Wärmebedarf – insbesondere für den Schmelzprozess – gehört die Glasindustrie zu den energieintensiven Industrien. Teils werden Temperaturen über 1500 °C benötigt. CO<sub>2</sub> wird prozessbedingt beim Aufschmelzen der Rohstoffe freigesetzt. Bis zu 80 Prozent der Gesamtemissionen sind energiebedingt. Die prozessbedingten Emissionen lassen sich nur durch andere Rohstoffe oder durch CO<sub>2</sub>-Abschneidung (ähnlich wie bei der Zementindustrie, vgl. Kapitel 2.5) reduzieren (BMWK 2022a, S. 10).

Der Anteil der in dieser Branche entstehenden Emissionen ließe sich mit grünem Wasserstoff vermeiden bzw. deutlich reduzieren. Die Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff in der Industrie ist mit Stand heute noch kein technischer Standard. Es gilt auch noch zu untersuchen, inwiefern ein neues Brennverfahren Auswirkungen auf den Schmelzprozess, auf die Produktqualität und auf die Schadstoffemissionen hat. Im Rahmen des HyGlass-Projektes konnte bislang festgestellt werden, dass nur moderate Auswirkungen auf die Verbrennung zu erwarten sind – solange Luftzahl und Brennerleistung durch eine Regelungsstrategie konstant gehalten werden können. Bezüglich der Glasqualität wurden leichte Änderungen festgestellt: „Wir haben festgestellt, dass es durch den Einsatz von Wasserstoff in der Glasschmelze indirekt zu Veränderungen der Glasqualität, z. B. Verfärbungen, kommen kann“ (BUNDESVERBAND SEKUNDÄRROHSTOFFE UND ENTSORGUNG 2022).

Das BMWK (2022a, S. 4) schätzt das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial durch den Einsatz von grünem Wasserstoff in Schmelzöfen der Glasindustrie in Deutschland auf rund 3,3 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.

Abbildung 18 stellt den Glasherstellungsprozess grafisch dar. Die letzten drei Produktionsschritte – das Schmelzen, die Glasformung und -kühlung – sind die energieintensivsten Schritte, in denen Wasserstoff als Brennstoff eingesetzt werden könnte. Glasschmelzanlagen sind bis zu 20 Jahre permanent in Betrieb. 24 Stunden, 7 Tage in der Woche und an jedem einzelnen Tag im Jahr wird in der Glaswanne Glas geschmolzen (sog. Wannenreise). Reparatur oder der Neubau einer Glaswanne erfolgt erst danach (ISLAMİ u. a. 2022). Insofern ist der Umrüstungszeitraum unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nur in engen Zeitspannen möglich.

**Abbildung 18: Glasherstellungsprozess**



Quelle: eigene Darstellung

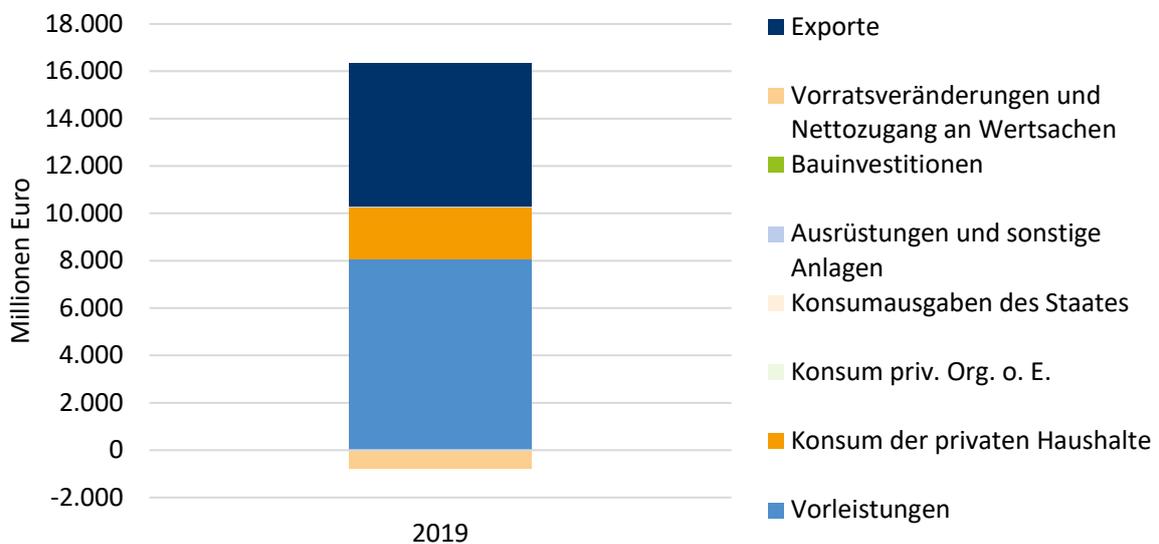
Die in der Branche am meisten diskutierten Alternativen sind die Elektrifizierung von Großwannen oder der Einsatz von Wasserstoff. Für beides gibt es Testprojekte, allerdings lassen sich insbesondere die großen Schmelzwannen aufgrund der hohen benötigten Temperaturen nur schwer elektrifizieren und können daher möglicherweise nur mittels grünem Wasserstoff dekarbonisiert werden (BMWK 2022a, S. 6). Neuwirth et al. (2022) schätzen den Technologiereifegrad von wasserstoffbefeuelten Öfen in der Glasindustrie mittelmäßig ein.

## 2.4.2 Nachfrage- und Kostenstruktur

Die Nachfrage- und Kostenstruktur kann für die Glasindustrie – anders als für die Zementindustrie – separat dargestellt werden (WZ 23.1).

Glas und Glaswaren werden zu einem Großteil als Vorleistungsprodukt (52 Prozent) für inländische Produktionsprozesse angewendet oder für den Export hergestellt (39 Prozent). 14 Prozent der gesamten Verwendung von Glas und Glaswaren werden für den Konsum privater Haushalte bereitgestellt (vgl. Abbildung 19).

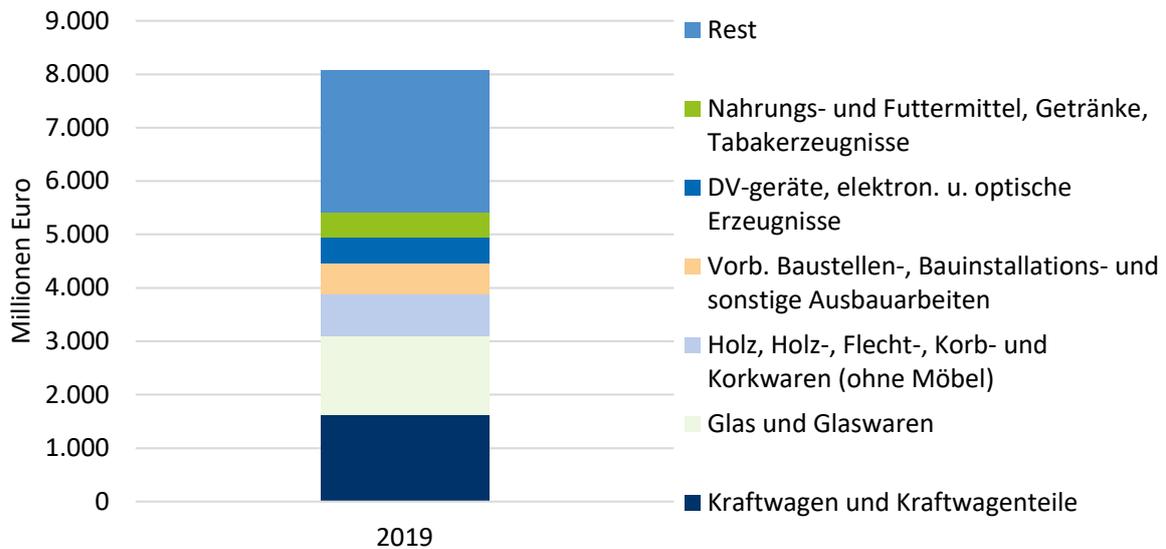
**Abbildung 19: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Glasindustrie (WZ 23.1) nach Verwendungskomponenten, 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Der wichtigste industrielle Abnehmer von Glas und Glaswaren ist die Fahrzeugindustrie. Mit 20 Prozent werden die meisten Erzeugnisse an diese Branche geliefert. Daneben sind brancheninterne Lieferungen mit 18 Prozent ebenfalls bedeutend. Zudem nimmt die Branche „Holz, Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel)“ (WZ 16) 10 Prozent der Vorleistungserzeugnisse der Branche ab. Mit 7 Prozent ist das Ausbaugewerbe ein ebenfalls wichtiger Abnehmer, ebenso wie die Nahrungsmittelindustrie (6 Prozent). Mit 7 Prozent ist auch ein Teil der Elektroindustrie Abnehmer von Glas und Glaswaren.

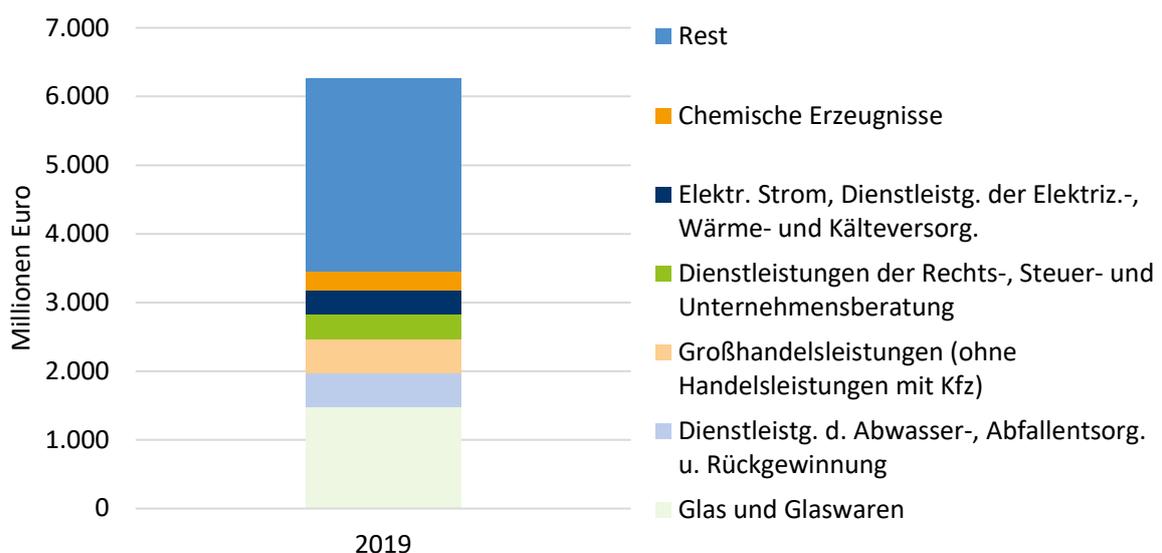
**Abbildung 20: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von Glas und Glaswaren (WZ 23.1), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die Kostenstruktur der Glasindustrie ist weniger stark konzentriert als in anderen Branchen. Mit 24 Prozent kommt der größte Kostenblock aus dem Ankauf von Erzeugnissen aus der eigenen Branche. 8 Prozent der Materialaufwendungen gehen in die Abfallentsorgung und Rückgewinnung – worunter sicherlich zu einem Großteil der Erwerb von Altglas fällt. Neben Großhandels- und Beratungsleistungen entfallen 6 Prozent der Materialkosten auf Strom, Wärme und Kälteversorgung.

**Abbildung 21: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Glasindustrie (WZ 23.1), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

### 2.4.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Die Drittquellen projizieren unterschiedliche Wasserstoffbedarfe, sind aber in ihrer eher geringen Bedarfseinschätzung relativ ähnlich.

**Tabelle 4: Geschätzter Wasserstoffbedarf für die Glasindustrie**

Zeitraum	Menge	Quelle
2030	1,5 TWh	BV GLAS 2022
2045	3 TWh	BV GLAS 2022
2050	13 TWh	SCHLICHTMANN u. a. 2022, S. 57

### 2.4.4 Fazit

Über die Elektrolyse hergestellter grüner Wasserstoff ist wahrscheinlich die einzige Option, die Hochtemperaturprozesse in der Glasindustrie (insbesondere beim Schmelzvorgang) zu dekarbonisieren. Die Produktionsprozesse bedürfen hierfür moderate Umrüstungsaufwendungen.

Noch ist offen, ob die Umstellung Auswirkungen auf die Qualität der Produkte haben wird und sich somit Nachfrageänderungen ergeben würden. Diese könnten sich insbesondere auf Glasbedarfe aus der Industrie erheblich auswirken, sodass diese ihre eigenen Produktlinien ggf. auf die neuen Qualitäten anzupassen hätten. Möglicherweise könnte „grünes“ Glas durch „fossiles“ Glas aus dem Ausland ersetzt werden.

Für die Kostenstruktur dürfte sich der Stromeinsatz erhöhen und der Ankauf von grünem Wasserstoff hinzukommen.

## 2.5 Zementindustrie (WZ 23.51)

Die Zementindustrie gehört der Abteilung Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (WZ 23) an und macht rund 10 Prozent am Umsatz aus (STATISTISCHES BUNDESAMT 2023a). Sie stellt einen kleinen Bereich der Gesamtbranche dar. Die Abteilung umfasst die Herstellung von Waren unter Verwendung von Stoffen mineralischen Ursprungs und beinhaltet u. a. die Herstellung von Erzeugnissen aus Zement und Gips, und zwar von den Rohstoffen bis hin zu den Fertigwaren (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 245).

### 2.5.1 Produktionsprozesse

Der Zementverbrauch betrug in Deutschland 2022 rund 33 Millionen Tonnen und wurde in knapp 53 Zementwerken von 21 Unternehmen hergestellt (VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE 2023). Wichtigster Rohstoff bei der Zementherstellung ist Kalkstein. Gemischt mit Ton wird dieser in einem Drehrohrofen gebrannt und dabei zu Branntkalk umgewandelt, wobei CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. Anschließend wird die

Mischung bei Temperaturen bis zu 1450 °C zu Zementklinkern gebacken (AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2020, S. 202).

Ein hoher Anteil des Energiebedarfs ist in der Zementindustrie durch alternative Brennstoffe (u. a. Altreifen, Altöl, Kunststoffabfälle etc.) gedeckt. Der Anteil von erneuerbaren und fossilen Abfällen am Endenergieverbrauch der Verarbeitung von Steinen und Erden betrug dabei im Jahr 2021 rund 30 Prozent. Die Zementindustrie ist in den Energiebilanzen nicht separat ausgewiesen, sondern nur als Teil dieses Gesamtsektors. Laut dem Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) beträgt der Anteil von alternativen Brennstoffen am Energieeinsatz in der Zementindustrie rund 70 Prozent (VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE 2023).

CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen zu zwei Dritteln beim Brennvorgang des Rohmaterials und zu einem Drittel bei der Verbrennung des Brennstoffes. Damit hat die Zementindustrie ein Grundproblem: Da die meisten Emissionen durch den Brennvorgang des Rohmaterials entstehen, ist eine Null-Emission nicht möglich – und zwar solange es keine Alternative zu Beton gibt. Für die Industrie bestehen dennoch mehrere Möglichkeiten, ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß innerhalb bestehender Produktionsrouten zu reduzieren:

- Steigerung der thermischen Effizienz
- Reduktion des Klinkerfaktors
- Brennstoffwechsel auf bspw. Wasserstoff
- Umstellung auf strombasierte Produktionsverfahren → sehr unwahrscheinlich
- Energieeffiziente Anlagenkomponenten

Ein Drittel der Emissionen könnten durch einen wasserstoffbasierten Brennvorgang vermieden werden, womit ein Erdgasanteil von rund 30 Prozent komplett durch grünen Wasserstoff ersetzt werden würde. Ein Ersatz der alternativen Brennstoffe und damit eine vollständige Wasserstoffnutzung wäre aus technischer Sicht ebenfalls denkbar, allerdings müssten die Brenner in den Drehrohröfen dafür ausgetauscht werden. Da allerdings noch keine Studien über eine 100-Prozent-Wasserstoffnutzung in diesem Sektor bekannt sind, bewerten Neuwirth et al. (2022) den Technologiereifegrad als mittelmäßig.

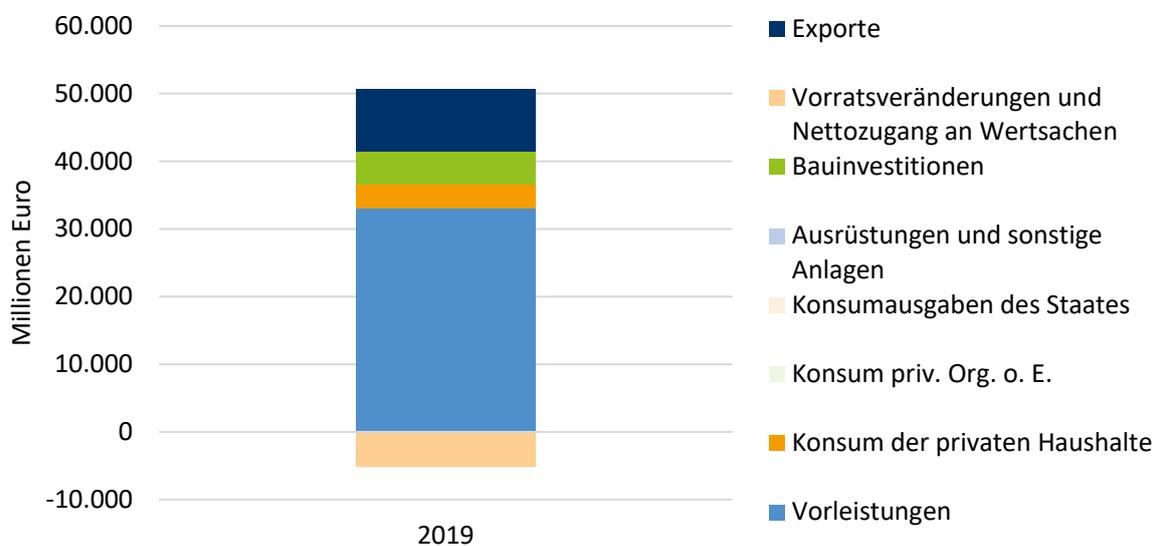
Alternativ können nur eine Verbrauchsreduktion, ein geringer Anteil an Zementklinkern oder CO<sub>2</sub>-Abscheidung funktionieren. Letzteres könnte für die Zementindustrie in Bezug auf die Reduktion der prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen die entscheidende technologische Transformation darstellen. Die Investitionen hierfür sind allerdings hoch und die rechtliche Lage bzgl. des Transports- und der Lagerung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> in Deutschland noch unklar, gleichwohl das Wirtschaftsministerium zuletzt signalisiert hat, dass CO<sub>2</sub>-Abscheidung für bestimmte Industrien möglich sein soll (BMWK 2024a).

## 2.5.2 Nachfrage- und Kostenstruktur

Die Nachfrage- und Kostenstruktur kann für die Zementindustrie nicht separat ausgewiesen werden, sondern lediglich in der Aggregation Keramik, verarbeitete Steine und Erden (WZ 23.2 bis WZ 23.9).

Laut der Input-Output-Tabelle des Jahres 2019 stellt dieser Teil der Branche primär Vorleistungsgüter für die inländische Produktionsbereiche her (72 Prozent). Zwar werden auch Güter exportiert, aber nur zu einem vergleichsweise geringen Anteil (20 Prozent). Güter für den privaten Haushalt werden nur in kleinen Teilen (8 Prozent) verkauft (vgl. Abbildung 22).

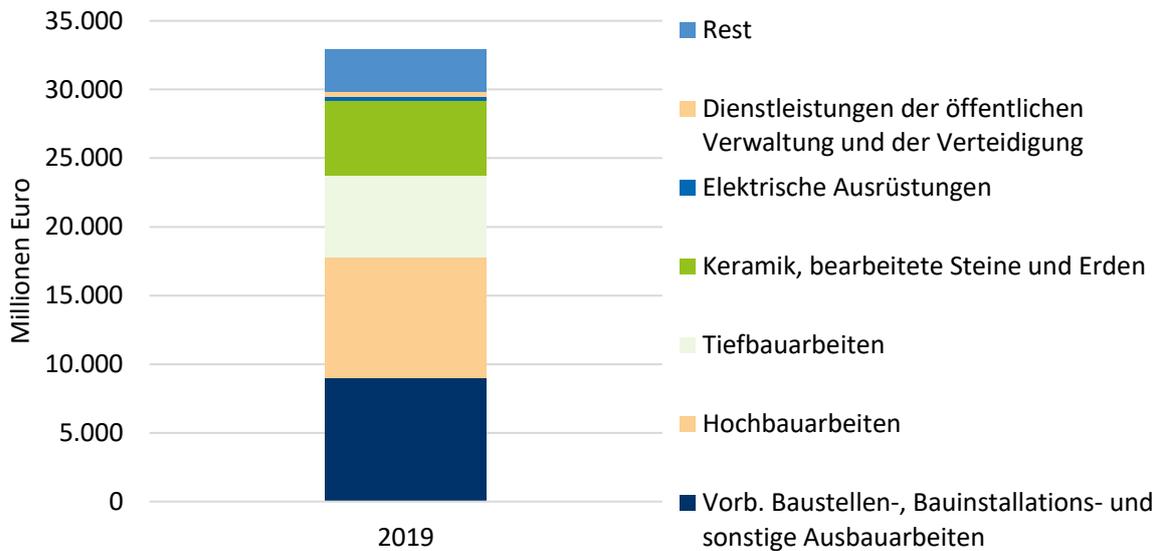
**Abbildung 22: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten Keramik-, Erden- und Steineindustrie (WZ 23.2–23.9) nach Verwendungskomponenten, 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Der Großteil der Vorleistungslieferungen geht in das Inland und vor allem an das Baugewerbe. Mit 72 Prozent ist das Baugewerbe der größte Abnehmer. Zu jeweils 27 Prozent sind der Hochbau und das Ausbaugewerbe die bedeutendsten Abnehmer. Mit 18 Prozent folgt der Tiefbau und zu 16 Prozent die brancheninternen Lieferungen (vgl. Abbildung 23).

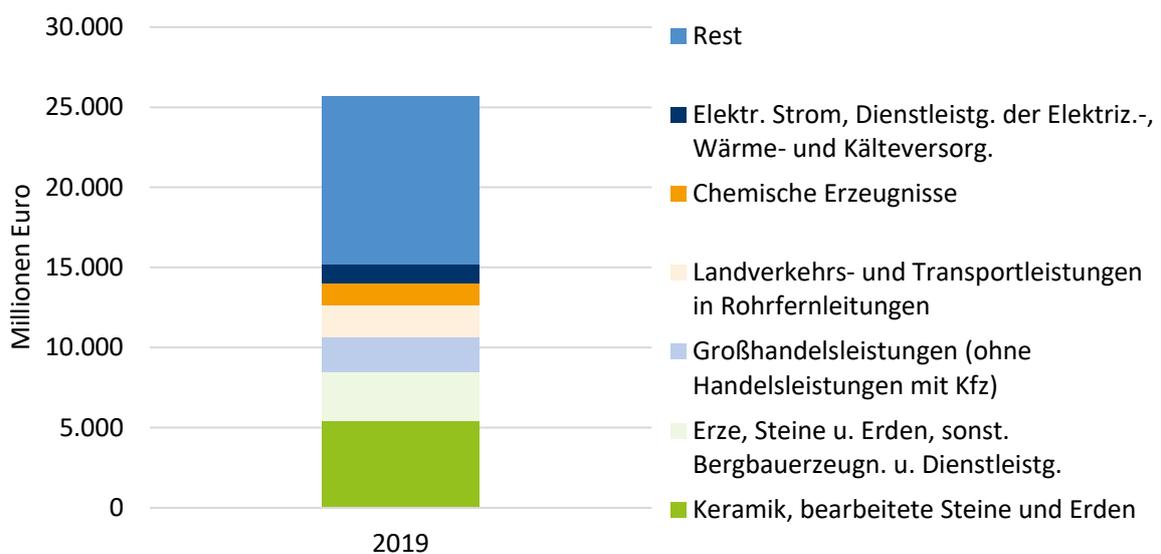
**Abbildung 23: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von Keramik und bearbeiteten Steinen und Erden (WZ 23.2–23.9), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die Kostenstruktur der Branche konzentriert sich jenseits des Bezuges von Erzeugnissen aus der eigenen Branche (21 Prozent) auf den Zukauf von Erzen, Steinen und Erden, sonstigen Bergbauerzeugnissen und Dienstleistungen (WZ 7–9). Diese nehmen einen Anteil von 12 Prozent an der Kostenstruktur ein. Daneben gehen Kosten für Großhandel und Verkehr (jeweils 8 Prozent) mit ein. Der Bedarf an Strom, Wärme und Kühlung nimmt 5 Prozent der Materialkosten in Anspruch. Chemische Erzeugnisse sind ebenfalls für den Herstellungsprozess relevant.

**Abbildung 24: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Keramik-, Erden- und Steineindustrie (WZ 23.2–23.9), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

### 2.5.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Der geschätzte Wasserstoffbedarf der Zementindustrie bleibt langfristig niedrig. Der Schätzung zufolge wird der Bedarf lediglich durch die Substitution von Erdgas und nicht auch der alternativen Brennstoffe bestimmt.

**Tabelle 5: Geschätzter Wasserstoffbedarf für die Zementindustrie**

Zeitraum	Menge	Quelle
2050	6 TWh	SCHLICHTMANN u. a. 2022, S. 54

### 2.5.4 Fazit

Grüner Wasserstoff kann für die Reduzierung der energetisch bedingten Emissionen in der Zementindustrie verwendet werden. Die Integration in den bestehenden Produktionsprozess erfordert keine höheren Umrüstungsinvestitionen. Sollte die Zementindustrie aber in die Abtrennung und Speicherung von CO<sub>2</sub> einsteigen, um auch die prozessbedingten Emissionen zu senken, sind erhebliche Investitionsbedarfe in entsprechende Anlagen notwendig.

Die Nachfragestruktur bleibt für die Branche unverändert, solange die Bauindustrie in ihrer jetzigen Form in Deutschland noch weiter besteht. Alternativen zu Beton stehen in absehbarer Zeit nicht zur Verfügung.

Neue Geschäftsmodelle könnten sich für die Zementindustrie einerseits daraus ergeben, dass die Abtrennung und Speicherung von CO<sub>2</sub> gelingt und andererseits daraus, dass die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen an Fahrt gewinnt. Für die Herstellung von E-Fuels ist CO<sub>2</sub> notwendig – welches entweder aus der Luft abgefangen oder aus Produktionsprozessen gespeichert werden kann.

Die Kostenstruktur könnte sich aufgrund des steigenden Wasserstoff- und Strombedarfes ändern.

## 2.6 Stahlindustrie (WZ 24.1)

Die Stahlindustrie gehört zur Abteilung Metallerzeugung und -bearbeitung (WZ 24). Sie entfällt auf die Gruppe WZ 24.1 „Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen“. Diese Gruppe macht circa 34 Prozent am Umsatz aus (STATISTISCHES BUNDESAMT 2023a) und stellt somit einen großen Bereich der Gesamtbranche dar. Die Abteilung Metallerzeugung und -bearbeitung umfasst die Tätigkeiten des Schmelzens und Legierens von Eisenmetallen und NE-Metallen aus Erz, Roheisen oder Schrott mit elektrometallurgischen und anderen metallurgischen Verfahren. Sie umfasst ferner die Herstellung von Metalllegierungen und Superlegierungen durch Zugabe anderer chemischer Elemente zu reinen Metallen. Die nach dem Schmelzen und Legieren in der Regel in Blockform zur Verfügung stehenden Erzeugnisse werden durch Walz-, Zieh- und Extrusionsverfahren zu Platten, Blech, Bandstahl,

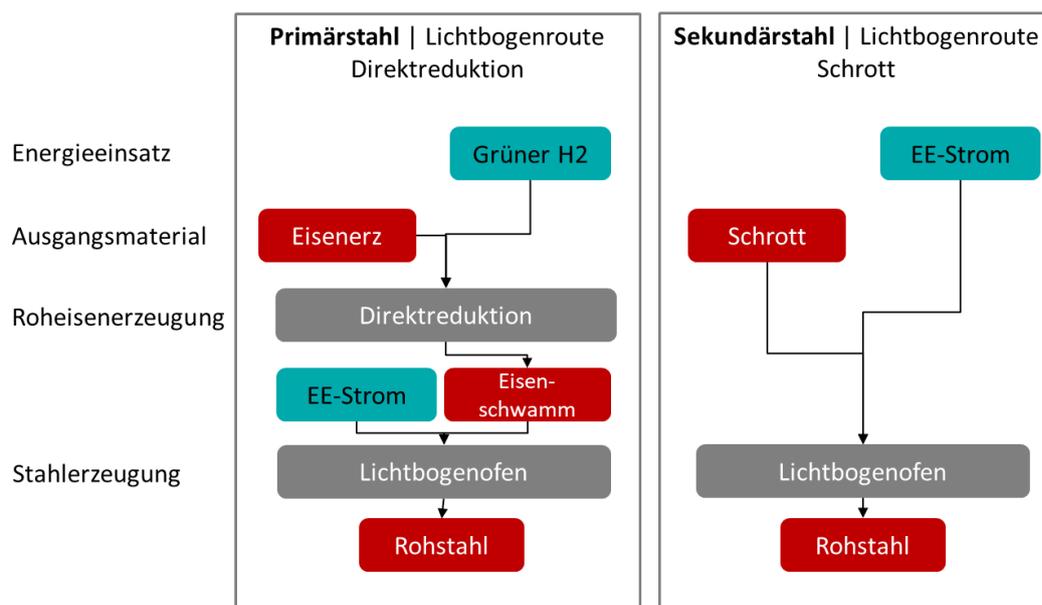
Stabstahl, Stangen, Draht, Rohren oder Hohlprofilen bzw. in geschmolzener Form zu Gusserzeugnissen und anderen Grundmetallerzeugnissen verarbeitet (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 253).

### 2.6.1 Produktionsprozesse

Mit rund 16 Mio. Tonnen prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie rund 39 Mio. Tonnen aus der Energieverwendung ist die Stahlindustrie eine der energie- und emissionsintensivsten Industrien Deutschlands (STATISTISCHES BUNDESAMT 2023b). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Stahlindustrie, bzw. die gesamte Metallerzeugung den höchsten Verbrauch an Steinkohleprodukten in der gesamten Industrie aufweist. Knapp 60 Prozent des Endenergiebedarfs wird durch Steinkohle und Koks gedeckt (AG ENERGIEBILANZEN 2023). Eine signifikante Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses in ihrem Produktionsprozess kann die Stahlindustrie nur mit grünem Wasserstoff erreichen.

Die Stahlproduktion kann unterteilt werden in Primär- und Sekundärstahlerzeugung. Sekundärstahl wird in einem mit Strom angetriebenen Lichtbogenofen aus Stahlschrott hergestellt. Diese Produktionsroute ist bereits zum größten Teil elektrifiziert. Anteilig rund 30 Prozent des produzierten Stahls ist dabei Sekundärstahl. Eine größere Herausforderung stellt die Primärstahlroute dar, in der mit 70 Prozent der überwiegende Teil des Rohstahls produziert wird. Hierbei wird zunächst in einem Hochofen Roheisen aus Eisenerz erzeugt. Als Reduktionsmittel und gleichzeitig Energieträger fungiert zumeist Koks. Anschließend wird das Roheisen in einem Konverter in mehreren Prozessschritten zu Rohstahl umgewandelt. Dabei wird dem Roheisen auch Kohlenstoff entzogen, woraus Prozessemissionen resultieren (AGORA ENERGIEWENDE/WUPPERTAL INSTITUT 2020).

**Abbildung 25: Geeignete Routen für die Dekarbonisierung der Stahlindustrie**



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 25 zeigt die unterschiedlichen Routen zur Rohstahlproduktion auf. Damit die Stahlproduktion CO<sub>2</sub>-frei sein kann, werden die Produktionsprozesse über den Hochofen oder die Schmelzreduktion aufgegeben. Stattdessen kann durch die Direktreduktion mittels Einsatzes von grünem Wasserstoff und erneuerbarem Strom auch die Primärstahlgewinnung in Deutschland aufrechterhalten werden. Bereits jetzt sind Direktreduktionsanlagen, in denen Erdgas als Reduktionsmittel verwendet wird, im Einsatz (HARTBRICH 2022). Allein dadurch können die Emissionen um rund 66 Prozent verringert werden. Der technologische Reifegrad eines Wasserstoffeinsatzes in Direktreduktionsanlagen zur Stahlerzeugung wird deshalb als hoch bewertet (NEUWIRTH u. a. 2022).

In Deutschland sind gegenwärtig an fünf Standorten 15 Hochöfen aktiv, welche Schätzungen zufolge alle auf Direktreduktionsverfahren umgestellt werden<sup>6</sup>. Unter Anwendung der Faustregel, dass die Dekarbonisierung von 1 Mio. Tonnen Rohstahl 1 Mrd. Euro an Investitionen kostet (WWF DEUTSCHLAND 2022, S. 9), und unter Berücksichtigung nur der durch Hochöfen produzierten Stahlmenge sowie der zu ersetzenden 15 Hochöfen ergibt sich ein Investitionsbedarf in Höhe von fast 26 Mrd. Euro.<sup>7</sup> Der Investitionsaufwand ist für die Branche sehr hoch.

#### 2.6.2 Nachfrage- und Kostenstruktur

Die Nachfrage- und Kostenstruktur kann für die Stahlindustrie nicht separat ausgewiesen werden, sondern lediglich in der Aggregation Roheisen, Stahl, Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl (WZ 24.1 bis WZ 24.3).

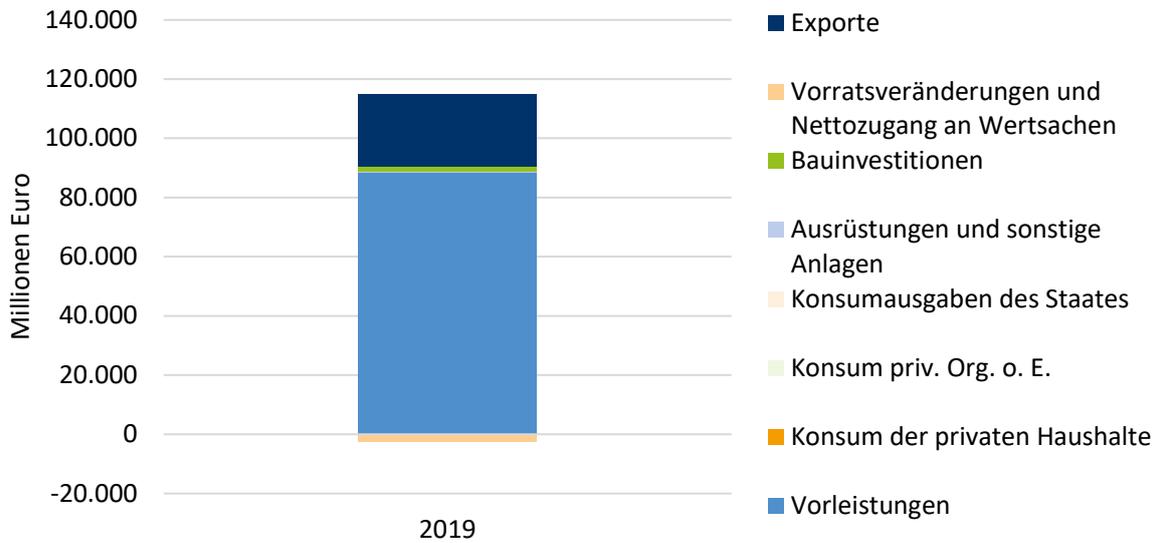
Die Erzeugnisse dieser Branche werden ausschließlich als Vorleistungsprodukte für die Verarbeitung in weiteren Produktionsprozessen anderer Industriebranchen benötigt. Entweder werden diese im Inland als Vorleistung (79 Prozent) verwendet oder in den Export (22 Prozent) gegeben.

---

<sup>6</sup> Von diesen Hochöfen unterhält ArcelorMittal zwei in Bremen und einen in Eisenhüttenstadt, Hüttenwerke Krupp Mannesmann zwei in Duisburg, Dillinger Hütte drei in Dillingen an der Saar, Salzgitter Stahl zwei in Salzgitter und Thyssen Krupp vier in Duisburg-Hamm (vgl. HANS-BÖCKLER-STIFTUNG (2023, S. 5)).

<sup>7</sup> 2022 hat Deutschland 36,9 Mio. Tonnen Rohstahl hergestellt. Davon sind circa 30 Prozent Sekundärstahl, der über die Lichtbogenroute hergestellt wird – dementsprechend wird 25,8 Mio. Tonnen Rohstahl über die Hochofenroute hergestellt. Auf die 15 Hochöfen umgerechnet produziert jeder Hochofen im Schnitt circa 1,7 Mio. Tonnen Primärrohstahl. Wenn alle 15 Hochöfen umgerüstet werden, bedeutet dies eine Investitionssumme von 25,8 Mrd. Euro.

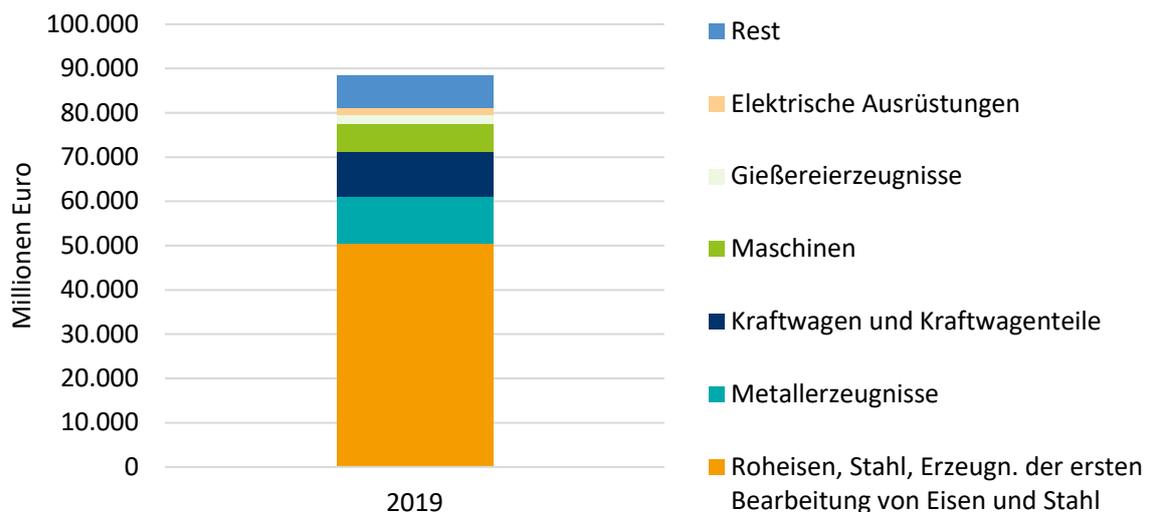
**Abbildung 26: Gesamte inländische und importierte Verwendung von Produkten der Roheisen- und Stahlerzeugung (WZ 24.1–24.3) nach Verwendungskomponenten, 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Der mit Abstand größte Abnehmer von Roheisen, Stahl und ersten Erzeugnissen daraus sind die weiteren Verarbeitungsprozesse innerhalb der eigenen Branche (57 Prozent). Außerhalb der eigenen Branche sind die wichtigsten Abnehmer die Hersteller von Metallerzeugnissen (12 Prozent), die Fahrzeugindustrie (12 Prozent), der Maschinenbau (7 Prozent) sowie die Hersteller von elektrischen Ausrüstungen (2 Prozent).

**Abbildung 27: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von Roheisen, Stahl und ersten Erzeugnissen daraus (WZ 23.2–23.9), 2019**

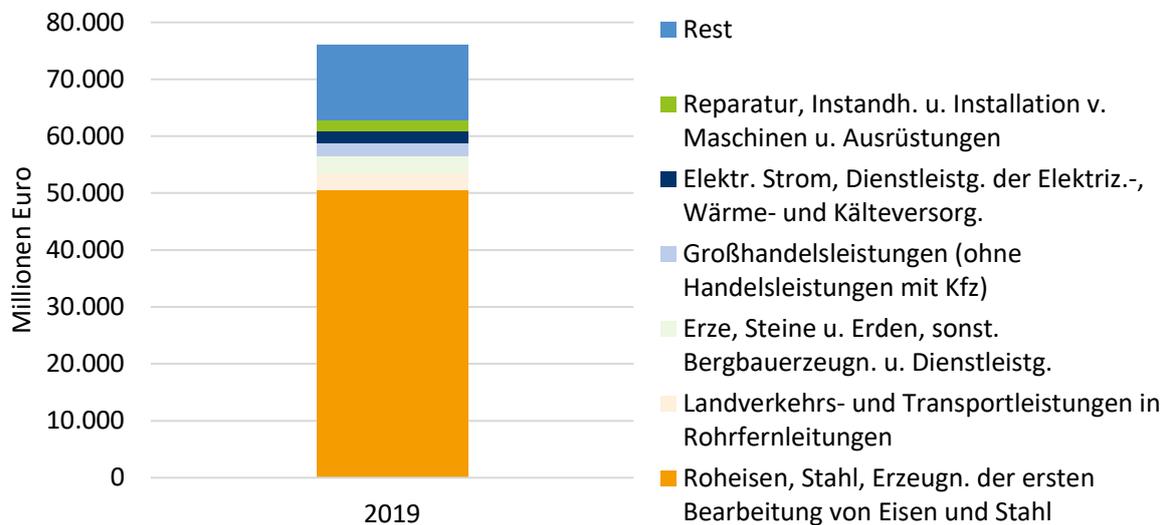


Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Zwei Drittel (66 Prozent) der Kosten machen die Vorleistungen aus der eigenen Branche aus. Mit großem Abstand folgen Landverkehr- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen (4 Prozent) –

worunter der Bezug von Erdgas als wichtigster Brennstoff über den Hochofenbetrieb über Rohrfernleitungen oder die Anlieferung von anderen Rohstoffen wie Koks oder Stahlschrott entfällt. Insbesondere für die Elektrostahlroute ist der Bezug von Strom ein wichtiger Kostenblock (3 Prozent).

**Abbildung 28: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten der Roheisen- und Stahlindustrie (WZ 24.1–24.3), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

### 2.6.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Der geschätzte Wasserstoffbedarf fällt für die Stahlbranche hoch aus. Vorwiegend wird der Einsatz von Erdgas als Energieträger durch Wasserstoff ersetzt werden.

**Tabelle 6: Geschätzter Wasserstoffbedarf für die Stahlindustrie**

Zeitraum	Menge	Quelle
2030	24 TWh	WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL 2022
2030	15 TWh	PROGNOS/ÖKO-INSTITUT/WUPPERTAL INSTITUT 2021
2030	27 TWh	STIFTUNG ARBEIT UND UMWELT DER IG BCE 2021
2030	11 TWh	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI 2022
2045	62 TWh	FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI 2022
2045	74 TWh	WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL 2022
2050	36 TWh	PROGNOS/ÖKO-INSTITUT/WUPPERTAL INSTITUT 2021
2050	91 TWh	STIFTUNG ARBEIT UND UMWELT DER IG BCE 2021
2050	81 TWh	SCHLICHTMANN u. a. 2022, S. 67

#### 2.6.4 Fazit

Für die Umrüstung auf die Direktreduktionsroute und das Ende der Hochofenroute fallen hohe Investitionskosten an, die über Investitionen in Elektrolyseure hinausgehen. Es müssen neue Produktionsanlage errichtet werden.

Sollte allerdings komplett auf die Primärroute verzichtet werden, wird auch kein Elektrolyseur notwendig. Es ist aber wohl am wahrscheinlichsten, dass die Primärroute weitestgehend erhalten bleibt. Dafür sprechen die bereits vom Bund bewilligten Fördergelder für die Umrüstung in der Stahlbranche in Höhe von 7 Mrd. Euro (OLK/WERMKE 2024).

Die Nachfragestruktur bleibt unverändert. Die Kostenstruktur dürfte sich für Strom erhöhen und für Kohleprodukte verringern. Der Transport via Rohrfernleitungen erhöht sich wahrscheinlich ebenfalls. Da Wasserstoff ebenfalls über Pipelines transportiert werden würde, würden die Kosten dafür etwas höher ausfallen – sofern nicht vor Ort von den Unternehmen selbst hergestellt wird.

## 2.7 Elektrische Ausrüstung (WZ 27) und Maschinenbau (WZ 28)

Die elektrische Ausrüstung und der Maschinenbau werden in einem Kapitel zusammen bearbeitet, da sie in Bezug auf Wasserstoff ähnlich betroffen sind.

Die elektrische Ausrüstung umfasst zum einen die Herstellung von Produkten, die Elektrizität erzeugen, verteilen und verwenden und zum anderen die Herstellung elektrischer Beleuchtungs- und Signalgeräte sowie elektrischer Haushaltsgeräte. Die Herstellung von elektronischen Erzeugnissen ist in einer anderen Branche erfasst (WZ 26) (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 283).

Der Wirtschaftszweig Maschinenbau umfasst den Bau von Maschinen, die mechanisch oder durch Wärme auf Materialien einwirken oder an Materialien Vorgänge durchführen (wie Bearbeitung, Besprühen, Wiegen oder Verpacken), einschließlich ihrer mechanischen Bestandteile, die Kraft erzeugen und anwenden, sowie spezieller Teile dafür. Der Fahrzeugbau ist in einer eigenen Branche erfasst (WZ 29.1) (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 291).

### 2.7.1 Produktionsprozesse

Die beiden Branchen sind zukünftig weniger ein bedeutender Wasserstoffproduzent oder -nutzer, als dass sie maßgeblich für die Herstellung, Fertigstellung und Bereitstellung von Elektrolyseuren im In- und Ausland verantwortlich sind. Dabei werden je nach Elektrolysetechnologie unterschiedliche Materialien und Komponenten benötigt. Mitunter, beispielsweise zur Herstellung von Protonen-Austausch-Membran (PEM) Elektrolyseuren, werden auch teure Edelmetalle wie Iridium oder Platin benötigt.

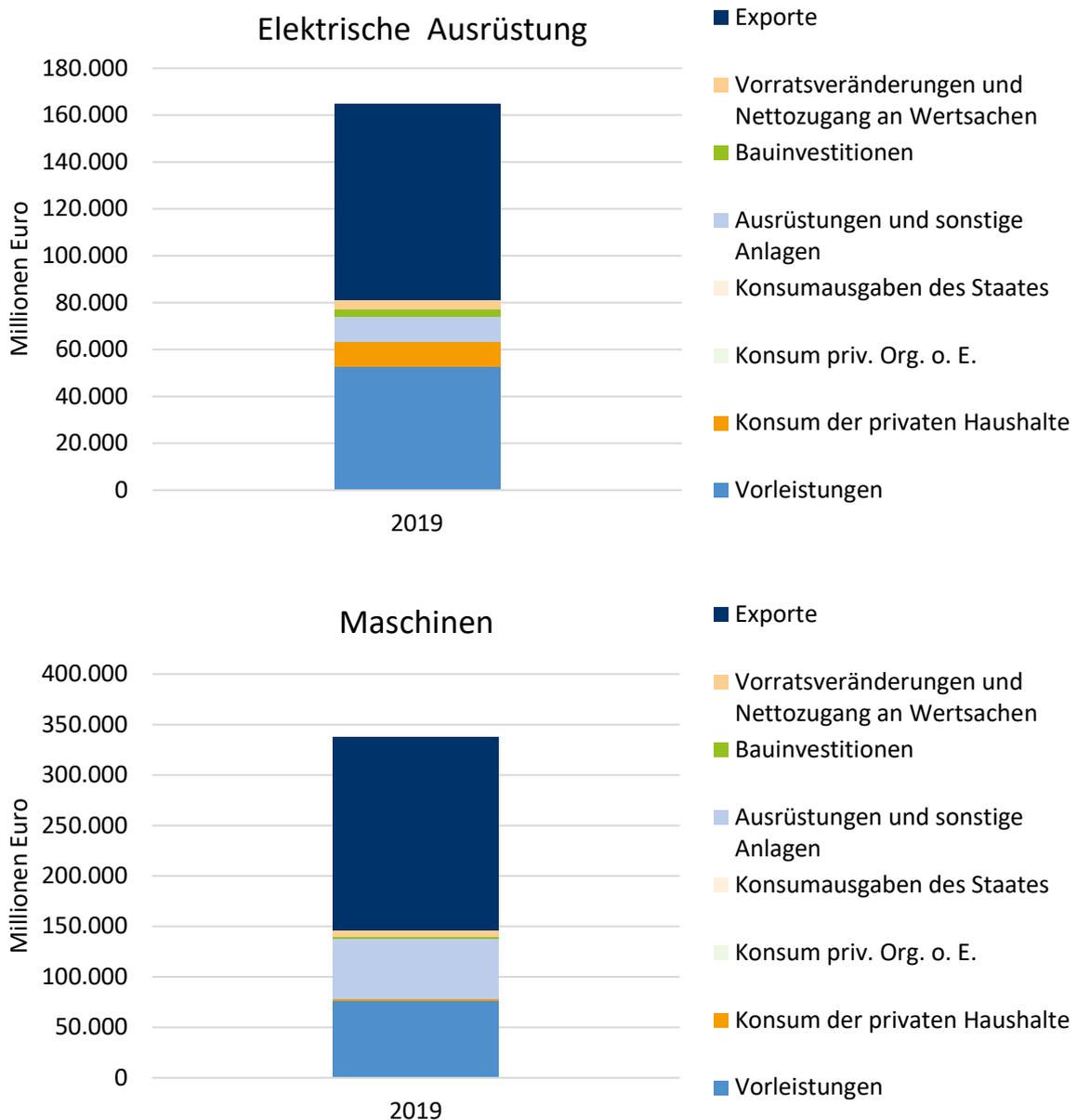
Neben den Elektrolyseuren werden in Zenk et al. (2023) noch weitere Technologien genannt, deren Herstellung diesen Branchen zugeordnet werden kann. Dazu gehören neben Brennstoffzellen für den Mobilitätsbereich auch die Direktreduktionsanlagen, wie sie künftig in der Stahlindustrie zur Wasserstoffnutzung benötigt werden. Insbesondere für den Export könnten Anlagen für Carbon Capture and Storage (CCS) oder -Usage (CCU) eine Rolle spielen. Diese werden bei der Herstellung von blauem Wasserstoff zur Abscheidung des entstehenden CO<sub>2</sub> benötigt. Für den deutschen Markt haben sie voraussichtlich allerdings eine geringere Bedeutung, da der Fokus auf grünem Wasserstoff liegt.

### 2.7.2 Nachfrage- und Kostenstruktur

Hersteller von elektrischer Ausrüstung und Maschinenbauer produzieren hauptsächlich für den Export. In der Regel handelt es sich dabei um Vorleistungsgüter, die für die Produktion in anderen Branchen notwendig sind. Teilweise werden auch Investitionsgüter hergestellt, wobei der Großteil Ausrüstungsinvestitionen sind und nur zu einem geringen Teil Bauinvestitionen. Nur wenige Produkte gehen direkt an den privaten Endverbraucher, wie bspw. elektrische Haushaltsgeräte. Das BMWK

(BMWK 2022b, S. 45) hält einen Weltmarktanteil deutscher Elektrolyseurhersteller von 10 Prozent für realistisch. Somit könnte der Exportanteil in der Nachfragestruktur künftig steigen.

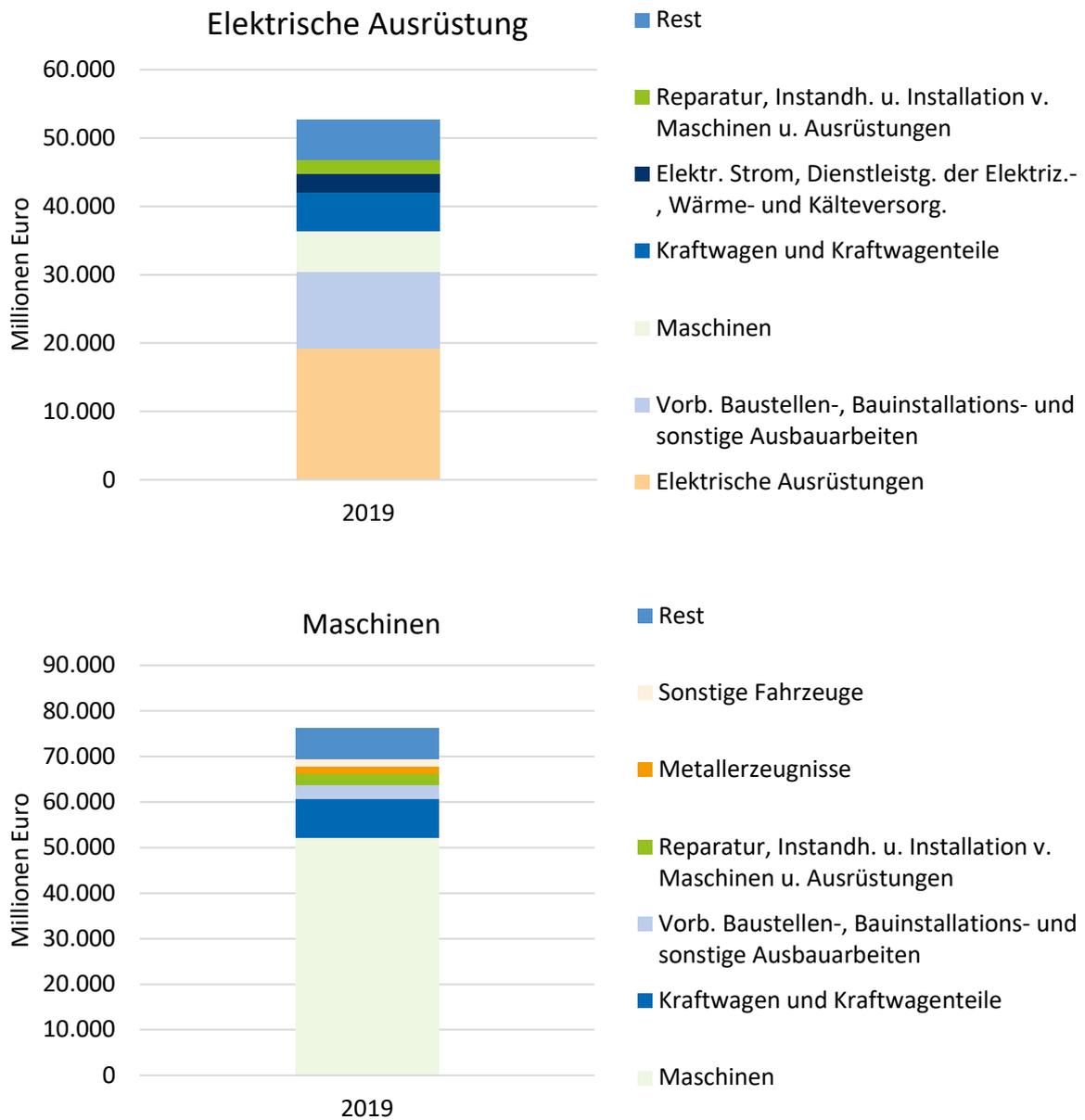
**Abbildung 29: Gesamte inländische und importierte Verwendung von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27) und Maschinenbau (WZ 28) nach Verwendungskomponenten, 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Von den Vorleistungsgütern ist die größte Abnehmerbranche von elektrischen Ausrüstungen – neben Unternehmen aus dem eigenen Produktionsbereich – das Ausbaugewerbe (WZ 43). Diese benötigen Materialien aus der Branche für Installations- und Ausbauarbeiten. Daneben sind wichtige Abnehmerbranchen sowohl der Maschinenbau als auch die Fahrzeugindustrie. Mit etwas Abstand folgt die Stromerzeugung. Maschinen werden jenseits ihrer eigenen Branche vor allem in der Fahrzeugindustrie benötigt, aber auch in der Metallerzeugung oder im Ausbaugewerbe.

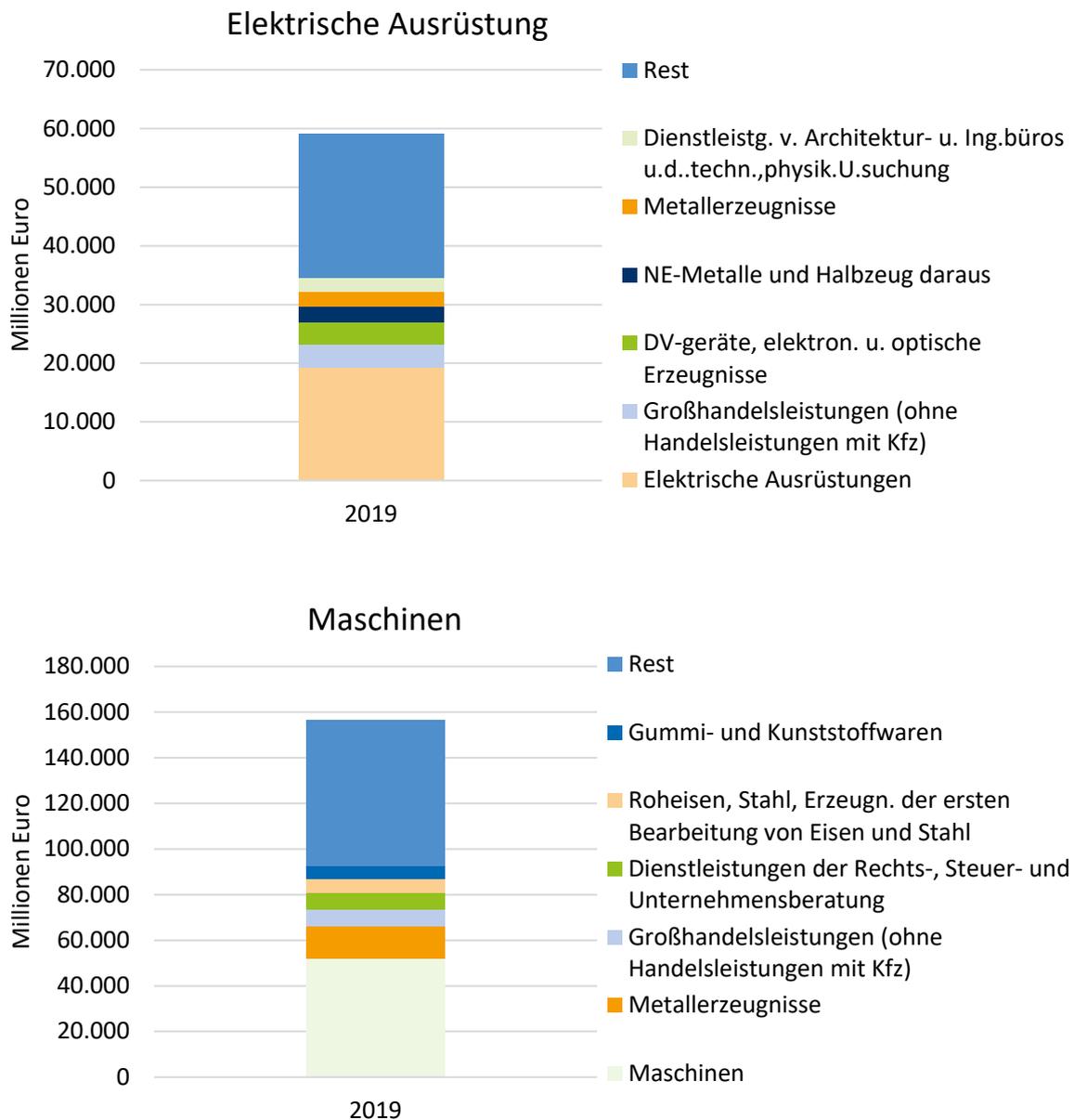
**Abbildung 30: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von elektrischen Ausrüstungen (WZ 27) und Maschinen (WZ 28), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die größten Materialkosten für die Eigenproduktion von elektrischen Ausrüstungen sind neben den Produkten aus der eigenen Branche vor allem Großhandelsleistungen, elektronische und optische Geräte sowie NE-Metalle und Metallerzeugnisse. Die Produktionskosten für die Maschinenproduktion bestimmt neben dem Einkauf anderer Maschinen der Einkauf von Metallerzeugnissen, Kraftwagen und Kraftwagenteile sowie Roheisen. Ob sich die Kostenstruktur jeweils ändert, hängt maßgeblich damit zusammen, in welcher Breite Wasserstoff angewandt wird, da dies die Nachfrage nach Elektrolyseuren und anderen Technologien bestimmt.

**Abbildung 31: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten für elektrische Ausrüstungen (WZ 27) und Maschinen (WZ 28), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

### 2.7.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Es gibt keine Bedarfsschätzungen für diese beiden Branchen. Es wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff nicht im Produktionsprozess eingesetzt wird. Als Dekarbonisierungsstrategie greift die Elektrifizierung.

### 2.7.4 Fazit

Die Branchen „Elektrische Ausrüstungen“ und „Maschinenbau“ sind Wegbereiter der grünen Wasserstofftransformation, da sie die Elektrolyseure zur Herstellung von grünem Wasserstoff und andere Wasserstofftechnologien herstellen. Zudem sind sie die Ausrüster für die Umrüstung mancher

Produktionsprozesse – sei es die Aufstellung von Direktreduktionsanlagen für die Stahlindustrie oder mögliche CCS-Anlagen für die Zementindustrie. Als Nutzer von Wasserstoff treten die beiden Branchen eher nicht in Erscheinung.

## 3 Energieversorgung

### 3.1 Elektrizitätsversorgung (WZ 35.1)

Die Elektrizitätsversorgung (WZ 35.1) umfasst die Erzeugung von elektrischem Strom, deren Übertragung von den Erzeugungsanlagen an Verteilerstationen und die Verteilung an die Endverbraucher. Zu Stromerzeugungsanlagen gehören fossilthermische Kraftwerke, Kernkraft-, Gasturbinen- und Dieselmotorkraftwerke sowie mit erneuerbaren Energieträgern (Windkraft, Wasserkraft, Sonnenenergie) betriebene Kraftwerke (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 334).

#### 3.1.1 Produktionsprozesse

Die Energieversorgungsbranche ist zu 90 Prozent von der Stromversorgung (WZ 35.1) dominiert. Die Gaserzeugung und -versorgung (WZ 35.2) nimmt einen Umsatzanteil von 9 Prozent ein, während die Versorgung mit Wärme und Kälte (WZ 35.3) eine entsprechend untergeordnete Rolle am Umsatz spielt. Der Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energien am Stromverbrauch lag im Jahr 2022 bei 47 Prozent. Strom aus Photovoltaikanlagen konnte um knapp 20 Prozent gesteigert werden. Bei Betrachtung der Energiequellen haben Kohle (33 Prozent) und Windstrom (24 Prozent) den größten Anteil an der Stromerzeugung. Der Kraftwerkspark zur Stromerzeugung der Energieversorger unterscheidet sich entsprechend des genutzten Energieträgers: Kohle-, Gas-, Wind-, Photovoltaik-, Biomasseanlagen etc.

Am 15. April 2023 sind die letzten drei Atomkraftwerke in Deutschland abgeschaltet worden. Damit gehört Strom aus Atomkraft in Deutschland der Vergangenheit an.

Auch Kohle zur Energiegewinnung hat ein Enddatum: Spätestens 2038 soll aus Kohle keine Energie in Form von Wärme oder Strom mehr gewonnen werden. Die aktuelle Regierung würde ein vorheriges Ende der Kohleenergiegewinnung (2030) begrüßen.<sup>8</sup> Damit werden im Zeitablauf auch immer mehr Kohlekraftwerke außer Betrieb genommen, bis spätestens voraussichtlich 2038 keines mehr läuft. Mit Stand November 2022 waren noch 147 Braun- und Steinkohlekraftwerke in Deutschland in Betrieb, wobei allein 26 davon aufgrund der Energiekrise eine nur befristete Strommarktrückkehrerlaubnis

---

<sup>8</sup> Der Kohleausstieg ist nur für die Stromerzeugung vorgegeben. Für Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird eine Reduktion des Kohleanteils lediglich angestrebt.

hatten. Weitere sechs Kohlekraftwerke fungieren als Netzreserve. Das heißt, momentan sind 115 Kohlekraftwerke im Dauerbetrieb (BUNDESNETZAGENTUR 2022).

Erdgaskraftwerke sind aktuell 696 in Betrieb. Zusätzlich stehen 23 Kraftwerke als Netz- und Kapazitätsreserve zur Verfügung. Vorläufig stillgelegt sind 12 Gaskraftwerke. Die Energiewende sieht eine deutliche Reduktion auch von Erdgas als Energieträger vor, weswegen auch langfristig Gaskraftwerke abgeschaltet werden. Für Erdgas gibt es allerdings kein Ausstiegsdatum, da Gaskraftwerke als Back-up für die schwankenden Einspeisungen aus erneuerbaren Energien noch längerfristig notwendig sind. Gleichzeitig gilt, dass zukünftig noch zu errichtende Gaskraftwerke h2-ready sein sollen, um zu gegebenem Zeitpunkt auf den Brennstoff Wasserstoff umgestellt werden zu können. Damit würde Wasserstoff zur Rückverstromung eingesetzt werden. Bis 2035 sollen laut der Kraftwerksstrategie 10 GW an H2-ready-Kraftwerken errichtet sein, die zwischen 2035 und 2040 auf Wasserstoff umgestellt werden (BUNDESREGIERUNG 2024).

Bei bestehenden Gaskraftwerken bedarf es Umrüstungen, wenn auch diese mit Wasserstoff betrieben werden sollen, da sich die Brenneigenschaft von Wasserstoff deutlich von der von Erdgas unterscheidet. Gemäß EU-Taxonomie müssen alle Gaskraftwerke spätestens bis 2036 derart umgerüstet sein, dass sie auch 100 Prozent Wasserstoff vertragen (DIERMANN 2022). Neben den Gasturbinen muss auch die weitere Infrastruktur für die Nutzung von Wasserstoff umgestellt werden. Da Wasserstoff eine geringere volumenspezifische Energiedichte hat als Erdgas, müssen Leitungen, Turbinenhallen etc. größer ausgestaltet sein.

Die grüne Energiewende beruht vor allem auf dem Ausbau von Wind- und Solarenergie. Im Jahr 2022 wurden rund 28 000 Windenergieanlagen an Land und 1 500 Anlagen auf der See gezählt.

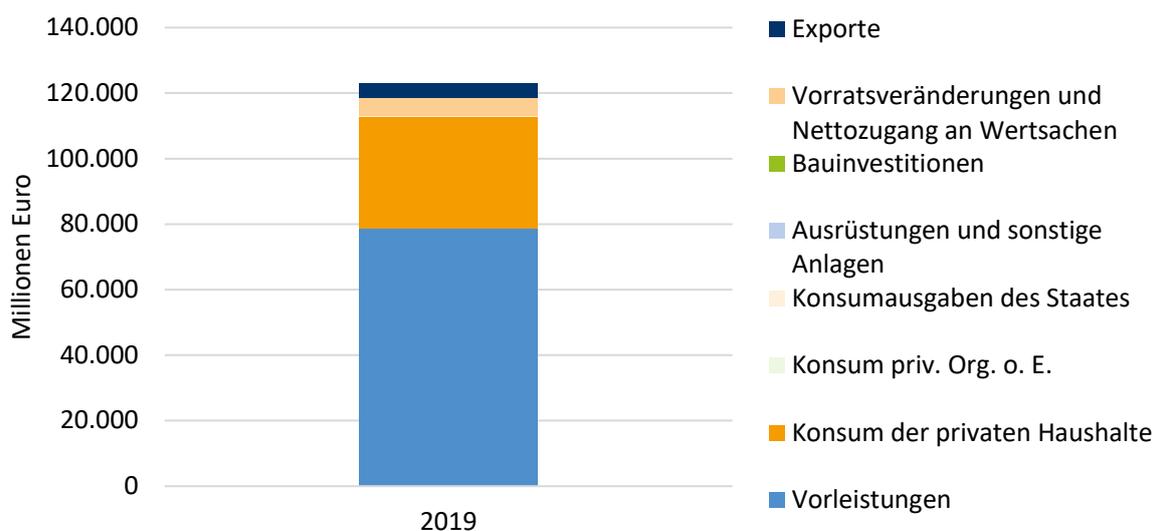
Die 28 000 Windenergieanlagen (WEA) an Land haben eine kumulierte Leistung von fast 60 000 MW. Bis 2030 soll die doppelte Leistung (115 000 MW) errichtet worden sein. Wenn eine WEA heute im Schnitt 2,15 MW Leistung fährt, müssten bis 2030 nochmal 26 000 WEA errichtet werden. Das wären über 3 000 WEA pro Jahr bzw. pro Tag müssten 9 WEA neu entstehen oder bestehende in ihrer Leistung erhöht werden. Für Windenergie auf See kann eine ähnliche Rechnung aufgestellt werden: 1 500 Anlagen erreichen eine kumulierte Leistung von heute 8 100 MW. Offshore-Anlagen können somit im Schnitt eine Leistung von 5,4 MW erreichen. Bis 2030 soll aus Offshore-Windparks eine Leistung von 40 000 MW erreicht werden. Es fehlen noch rund 32 000 MW, für die rund 6 000 Offshore-Anlagen noch errichtet oder in ihrer Leistung verstärkt werden müssten. Das wären pro Jahr 750 WEA auf See, oder 2 pro Tag – ungleich weniger als auf Festland, dafür sind aber auch die Errichtung von WEA auf See deutlich aufwändiger (BUNDESVERBAND WINDENERGIE 2024a; 2024b).

Laut Statistischem Bundesamt waren im Juni 2023 2,6 Mio. Photovoltaikanlagen auf Dächern und Grundstücken von Unternehmen oder privaten Haushalten installiert (STATISTISCHES BUNDESAMT 2023a).<sup>9</sup> Für die Energiewende relevant dürften aber vor allem Solkraftwerke oder Solarparks sein. Rund 20 Prozent der Photovoltaikleistung dürfte auf Solarparks zurückzuführen sein (FISCHER 2022). Die heutige Nennleistung aus Photovoltaikanlagen von 58 500 MW soll bis 2030 auf 215 000 MW erhöht werden – was einer Verdreifachung der heutigen Leistung binnen acht Jahren entspricht. Aufgrund der Dezentralität der Photovoltaikanlagen ist es schwierig abzuschätzen, wieviel davon durch Solarkraftwerke oder Kleinanlagen auf Dächern erreicht wird.

### 3.1.2 Nachfrage- und Kostenstruktur

Die Erzeugnisse dieser Branche werden zu fast zwei Dritteln als Vorleistungsprodukte für die Verwendung in weiteren Produktionsprozessen anderer Industriebranchen im Inland benötigt (64 Prozent). 28 Prozent werden von privaten Haushalten als Endprodukt nachgefragt.

**Abbildung 32: Gesamte inländische und importierte Verwendung von elektrischem Strom und Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung (WZ 35.1/35.3) nach Verwendungskomponenten, 2019**

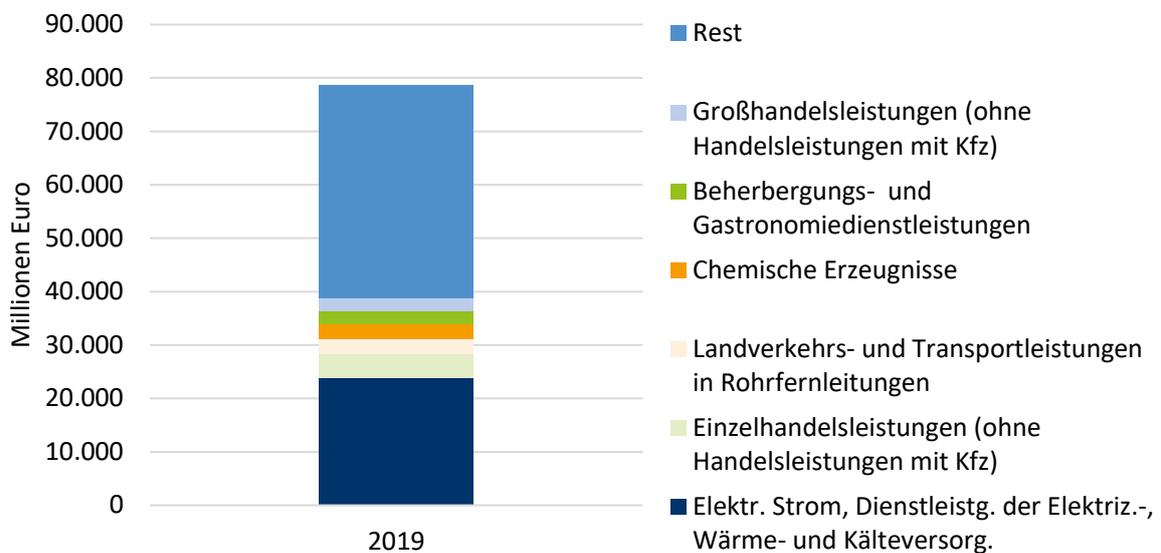


Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die größten Abnehmer sind neben Kunden der eigenen Branche der Groß- und Einzelhandel (zusammen 9 Prozent), die Chemieindustrie (4 Prozent) und der Landverkehr (4 Prozent). Auch Beherbergungs- und Gastronomiedienstleister treten als starke Nachfrager auf.

<sup>9</sup> Erfasst werden alle Photovoltaikanlagen, die in die Netze der öffentlichen Versorgung einspeisen und über einen Stromzähler verfügen, der die eingespeisten Strommengen misst. Kleinere Anlagen, wie etwa die sogenannten Balkonkraftwerke, fallen daher in der Regel nicht darunter.

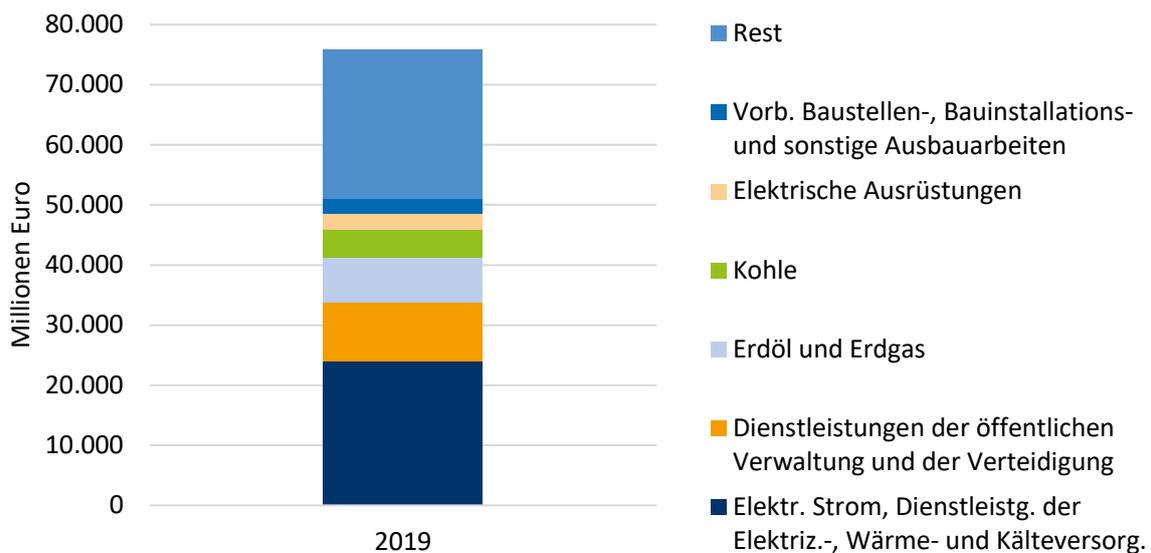
**Abbildung 33: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von elektrischem Strom und Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung (WZ 35.1/35.3), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die Kostenstruktur der Branche bestimmt sich vorwiegend aus dem Bezug von Strom und Wärme und daran angelehnte Dienstleistungen aus dem eigenen Bereich sowie von dem Einkauf von Primärenergieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas zur Erzeugung von Strom und Wärme. Daneben werden elektrische Ausrüstungen und diverse Bauleistungen benötigt.

**Abbildung 34: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten für elektrischem Strom und Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung (WZ 35.1/35.3), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

### 3.1.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Langfristig wird der Wasserstoffbedarf für die Stromversorgung an Bedeutung gewinnen. Das spiegeln auch die relativ hohen, langfristigen Bedarfsschätzungen aus Drittquellen wieder.

**Tabelle 7: Geschätzter Wasserstoffbedarf für den Stromsektor**

Zeitraum	Menge	Quelle
2030	20 TWh	NATIONALER WASSERSTOFFFRAT 2023, S. 9
2040	288 TWh	NATIONALER WASSERSTOFFFRAT 2023, S. 9
2045	85–150 TWh	DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN E.V.2024

### 3.1.4 Fazit

Für die Stromerzeuger ist ein starker Umbruch zu erwarten. Fossile Kraftwerke werden entweder durch erneuerbare Energietechnologien ersetzt oder müssen auf erneuerbare oder CO<sub>2</sub>-arme Gase wie Wasserstoff umgerüstet werden. Zudem ist der Ausbau erneuerbarer Energien – insbesondere Windenergie, aber auch Solarenergie – ein Mammutprojekt.

Die Nachfragestruktur der Elektrizitätsversorger ändert sich zwar voraussichtlich nicht großartig, allerdings dürfte sich die Nachfrage nach Strom deutlich erhöhen. Auch die Stromproduktion verändert sich mit hoher Wahrscheinlichkeit merklich. Statt auf fossile Energieträger wird vor allem auf erneuerbare Energien und auf Wasserstoff als Ersatz für Erdgas und als Back-up-Technologie gesetzt. Neue Gaskraftwerke werden gebaut und alte auf die Verstromung von erneuerbaren oder CO<sub>2</sub>-armen Gasen wie Wasserstoff umgerüstet.

Die Kostenstruktur verändert sich erheblich. Kosten für Kohle, Erdöl und Erdgas werden deutlich rückläufig sein, wenn nicht sogar ganz wegfallen. Dafür kommt der Einkauf von grünem Wasserstoff als neuer Kostenblock hinzu. Da dieser voraussichtlich auch für viele Jahre teurer sein dürfte als die fossilen Energieträger, fällt der Kostenanteil entsprechend recht hoch aus. Positiv auf die Kostenstruktur wirkt sich dagegen aus, dass bei Wind- und Solarenergie keine Kosten für den Energieträger anfallen.

Allerdings sind für den Aufbau der neuen Energieinfrastruktur erhebliche Investitionen erforderlich, die in den nächsten Jahren deutlich zunehmen. Neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien binden auch die Umrüstungen des Gaskraftparks auf Wasserstoff-Readiness Kapital.

## 3.2 Gasversorger (WZ 35.2)

Diese Gruppe umfasst die Erzeugung von Gas zu Versorgungszwecken und die Verteilung von Erd- oder Synthesegas an die Verbraucher durch Rohrleitungen. Eingeschlossen sind Anbieter oder Makler, die den Verkauf von Gas über Gasverteilungsnetze vermitteln, die von Dritten betrieben werden (STATISTISCHES BUNDESAMT 2008, S. 335).

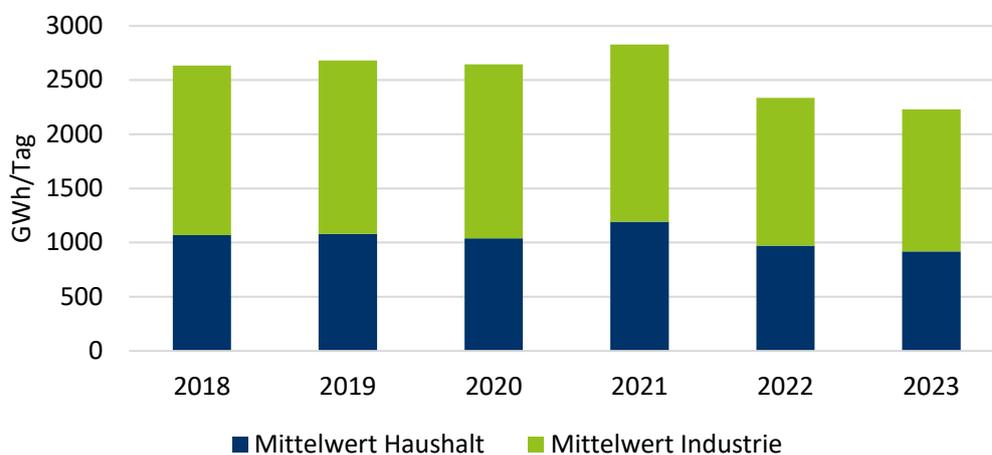
Der selbstständige Betrieb von Gas(fern)leitungen, die Gaserzeuger mit -verteilern oder verschiedene Ballungsgebiete miteinander verbinden, gehört nicht zu dieser Gruppe, sondern zum Transport in Rohrfernleitungen (WZ 49.5).

### 3.2.1 Produktionsprozesse

Die Gaserzeugung und -versorgung (WZ 35.2) nimmt einen Umsatzanteil von 9 Prozent an der gesamten Branche der Energieversorgung ein. Sie ist deutlich kleiner als die Stromversorgung.

Der Gasverbrauch betrug vor Beginn des Ukrainekrieges im Jahr 2022 im Durchschnitt etwa 2500 GWh/Tag. 60 Prozent des Gases wurde von der Industrie<sup>10</sup> abgenommen, der Rest von privaten Haushalten und Gewerbekunden. Mit Beginn des Krieges und mit Ende der Gaslieferungen aus Russland hat sich der Gasverbrauch deutlich gesenkt und lag 2023 im Schnitt bei 2229 GWh/Tag. Die Reduktion hat zu keiner anteiligen Veränderung zwischen Groß- und Kleinkunden geführt.

**Abbildung 35: Durchschnittlicher Gasverbrauch in der Industrie und Haushalten/Gewerbe**



Quelle: BUNDESNETZAGENTUR 2024

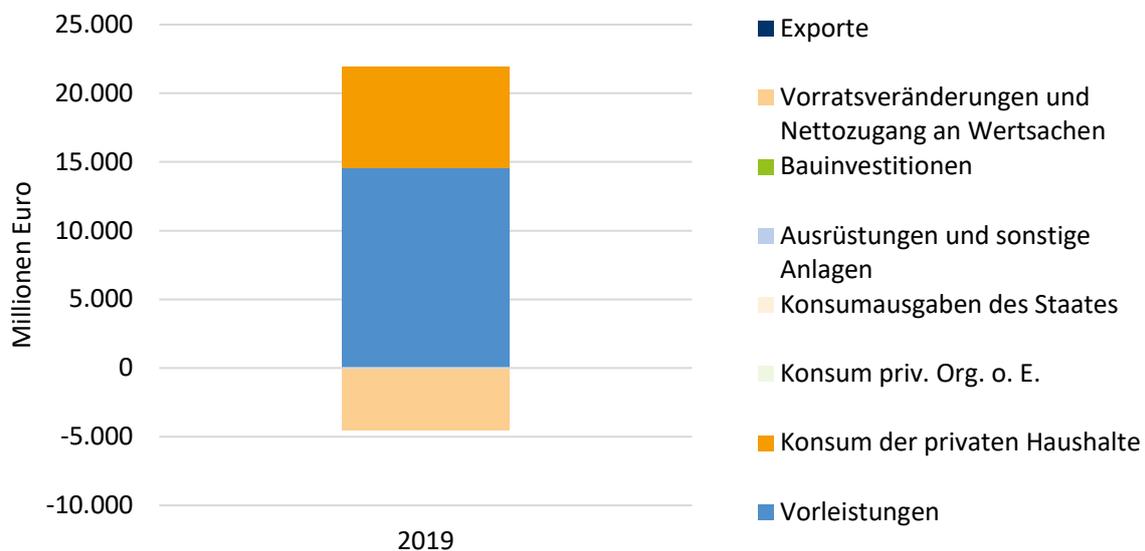
<sup>10</sup> Zu Industriekunden gehören Abnehmer, die mehr als 1,5 GWh Jahresverbrauch zählen. Alle anderen Abnehmer zählen zu Haushalt oder Gewerbe. Im Gasverbrauch der Industriekunden ist auch der Gasverbrauch durch Stromerzeugung enthalten.

Der Gasverbrauch in Abbildung 35 inkludiert auch den Verbrauch zur Stromgewinnung in den oben genannten 696 Erdgaskraftwerken (vgl. Kapitel 3.1.1). Gemäß BMWK (BMWK 2024b) betrug der Erdgaseinsatz für die Bruttostromerzeugung im Jahr 2019 89 800 GWh. Umgerechnet auf Tageswerte beläuft sich dies auf 246 GWh/Tag, was einem Anteil am Gesamtgasverbrauch des Jahres 2019 von 9 Prozent entspricht. Der Großteil des Gasverbrauches geht also direkt an die Kunden, um dort in Wärme oder als Energie- und/oder Rohstoff für die Produktionsprozesse verwendet zu werden. Der Anteil ist über die Jahre mit leichten Schwankungen konstant.

### 3.2.2 Nachfrage- und Kostenstruktur

Industriell erzeugte Gase gehen entweder als Vorleistungsinput in den Produktionsprozess anderer Produktionsbereiche ein oder werden in Form von Wärme direkt an den privaten Haushalt geliefert.

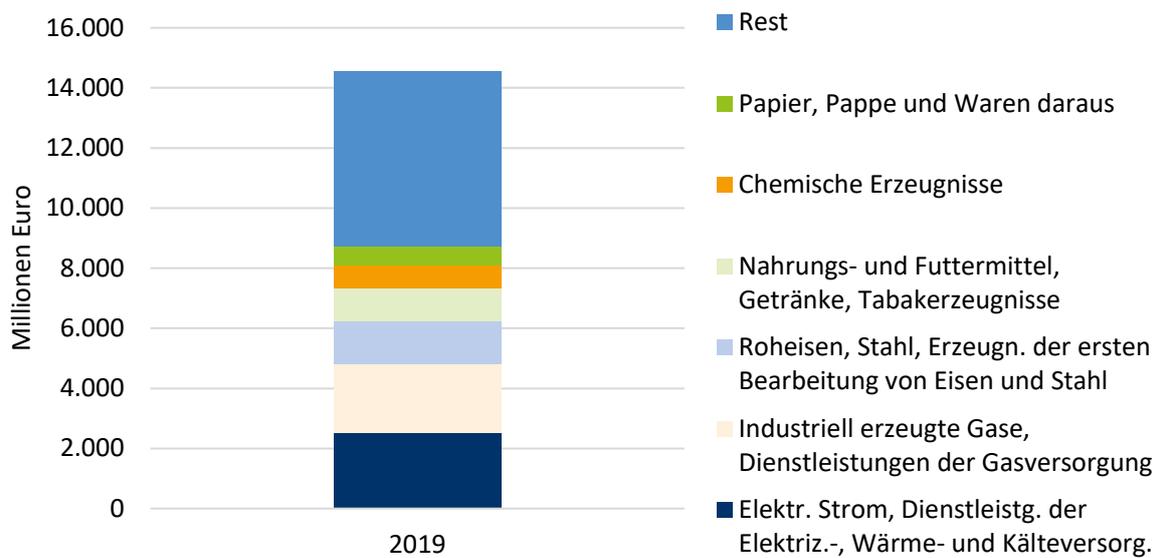
**Abbildung 36: Gesamte inländische und importierte Verwendung von industriell erzeugten Gasen (WZ 35.2) nach Verwendungskomponenten, 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Als Vorleistungslieferung wird Gas zum einen für die Stromerzeugung und zum anderen zur brancheninternen Weiterverarbeitung genutzt. Außerhalb des Bereichs der Energieversorgung (WZ 35) werden industriell erzeugte Gase direkt von der Stahlindustrie, der Chemieindustrie, der Papierindustrie und der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie nachgefragt.

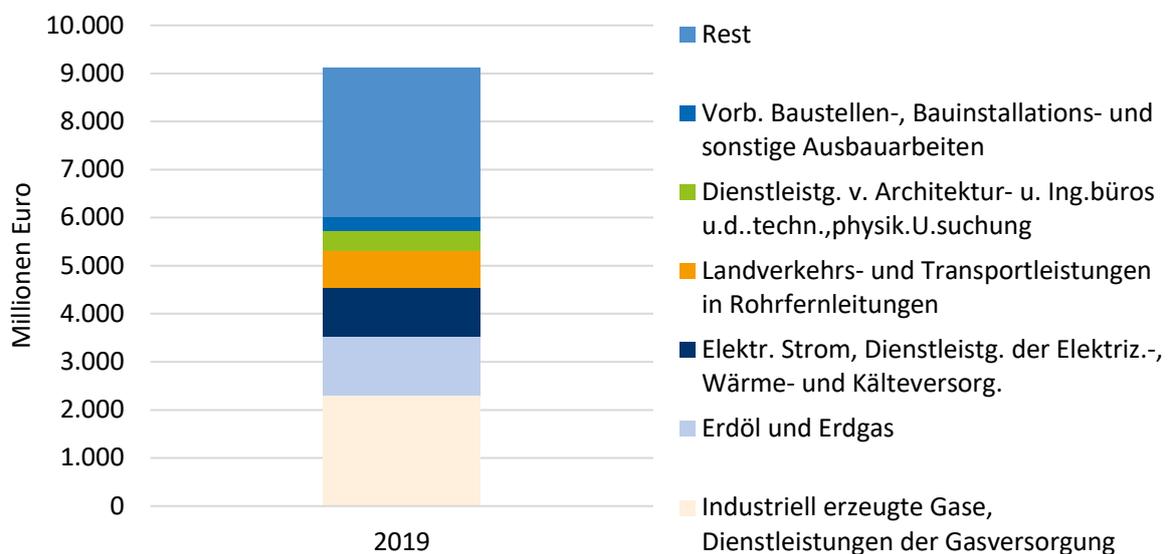
**Abbildung 37: Gesamte Vorleistungslieferung: die sechs größten Abnehmerbranchen von industriell erzeugtem Gas (WZ 35.2), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

Die größten Kosten für die Gasversorger entstehen nach dem Bezug von Produkten aus der eigenen Branche durch den Einkauf von Erdgas und den Antransport des Produktes vor allem via Transportfernleitungen.

**Abbildung 38: Gesamte Kostenstruktur: die sechs größten Lieferanten für industriell erzeugte Gase (WZ 35.2), 2019**



Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2022a; eigene Berechnung

### 3.2.3 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Es liegen keine Informationen aus Drittquellen zu künftigen Wasserstoffbedarfen der Branche vor. Die für die Stromerzeugung benötigte Wasserstoffmenge ist in Kapitel 3.1 aufgeführt.

### 3.2.4 Fazit

Die Nachfrage nach Gas dürfte sich insgesamt schmälern, da ein großer Teil des jetzigen Bedarfes aufgrund der Elektrifizierungsstrategie im Wärmesektor wegfällt. Als Vorleistungsnachfrage substituiert Wasserstoff voraussichtlich in Teilen den Bedarf an Erdgas. Insgesamt dürfte aber auch der Vorleistungseinsatz geringer ausfallen, da die Elektrifizierungsstrategie auch hier für manche Erdgasnutzer die kostengünstigere Dekarbonisierungsstrategie darstellt. Die Kostenstruktur der Gasversorger ändert sich ebenfalls. Ein sinkender Bedarf an fossilem Erdgas wird durch einen steigenden Bedarf vor allem an grünem Strom für die Wasserstoffproduktion ersetzt. Investitionen in die Wasserstoffproduktion fallen entsprechend hoch aus.

## 4 Verkehrssektor

Der Verkehrssektor subsumiert die unterschiedlichen Transportmöglichkeiten auf Straße, Schiene, Wasser und Luft. Je nach Transportweg kann Wasserstoff oder Wasserstoff als Derivat unterschiedlich genutzt werden. Im Folgenden wird vor allem auf die Nutzung und Herstellung von synthetischem Kraftstoff (im Weiteren „E-Fuels“) eingegangen.

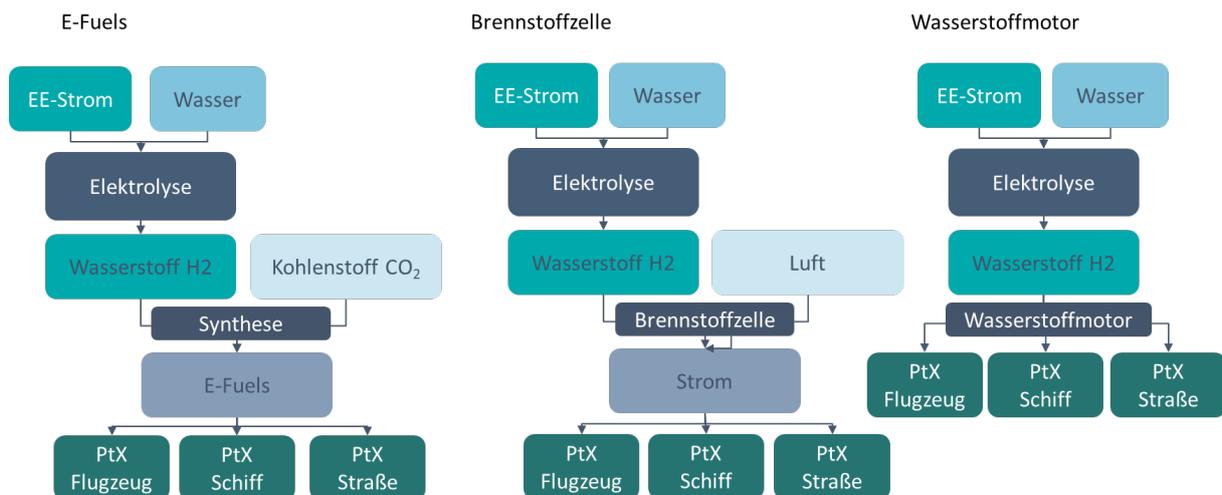
### 4.1 Produktionsprozesse

Mit der Einigung im Koalitionsausschuss vom 28. März 2023 – dem sogenannten Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung – hat sich das vermeintliche “Verbrenner-Aus” in Deutschland (genauso wie in ganz Europa) ab 2035 dahingehend abgeschwächt, als dass auch nach 2035 Neuzulassungen mit einem Verbrennungsmotor erlaubt sind, wenn diese neu zugelassenen Pkw und leichten Nutzfahrzeuge keine zusätzlichen Klimagase ausstoßen. Damit wurde dem synthetischen Kraftstoff die Tür geöffnet und den Herstellern die Möglichkeit gegeben, mit entsprechenden Vorrichtungen weiterhin auch Autos mit Verbrennungsmotor produzieren zu können.

E-Fuels werden mittels Synthese von Wasserstoff und einer Kohlenstoffquelle hergestellt. Dadurch, dass hierfür zunächst Kohlendioxid aus der Luft (oder anderen Produktionsprozessen) entzogen und dann später wieder ausgestoßen wird, kann von CO<sub>2</sub>-Neutralität gesprochen werden – wenn der für die Synthese notwendige Wasserstoff aus erneuerbaren Energien gewonnen wird.

Die Wasserstoffelektrolyse kann neben E-Fuels auch für die Brennstoffzelle oder für den Wasserstoffmotor angewendet werden. Bisher sind in Deutschland nur einige wenige Autos mit Brennstoffzellenmotor unterwegs – diese werden allerdings allesamt mit Wasserstoff auf fossiler Basis betrieben und gelten somit nicht als klimaneutral oder klimafreundlich. Der Koalitionsbeschluss könnte allerdings dem E-Fuel Auftrieb geben. Abbildung 39 stellt die unterschiedlichen Herstellungsprozesse für nachhaltigen Treibstoff aus grünem Wasserstoff dar.

**Abbildung 39: E-Fuels, Brennstoffzelle und Wasserstoffmotor im Vergleich**



Quelle: eigene Darstellung

Wie in Tabelle 8 dargestellt, scheint unter den drei Möglichkeiten, mittels grünem Wasserstoff Mobilität zu erzeugen, die Brennstoffzelle die zu priorisierende Variante zu sein. Gegen Wasserstoffmotor und E-Fuels spricht die deutlich schlechtere Energieeffizienz. Gleichzeitig ist die Reichweite ebenso wie der Ladevorgang bei Brennstoffzellen ähnlich zu Fahrzeugen, die mit E-Fuels fahren. Ein Nachteil der Brennstoffzelle genauso wie für den Wasserstoffmotor ist die dafür noch auszubauende Ladeinfrastruktur und die speziellen Wasserstofftanksäulen.

Synthetische Kraftstoffe gewinnen aber besonders in der Luft- und Schifffahrt an Bedeutung. Im Fit-for-55-Paket ist für die Luftfahrt bereits eine Beimischungsquote von synthetischem Kraftstoff auf europäischer Ebene beschlossen worden. Bis 2050 soll möglichst 70 Prozent der Luftfahrt auf Basis von alternativem Kraftstoff fliegen, davon sollen mindestens 35 Prozent synthetische Flugkraftstoffe sein. Die beschlossenen Beimischungsquoten für 2030 sind allerdings sehr gering: 2030 soll lediglich ein Anteil von 2 Prozent erreicht werden. Für die Schifffahrt ist bislang keine Beimischungsquote beschlossen worden, sie wird aber aktuell diskutiert (KOERTH/HAITSCH 2023).

**Tabelle 8: Vergleich von Antriebstechnologien auf Wasserstoffbasis**

	E-Fuels	Brennstoffzelle	Wasserstoffmotor
Verbreitung	Gibt es (noch) nicht in großen Volumen	Zwei Modelle bislang in Deutschland zugelassen (von Hyundai und Toyota) Weniger als 1000 Neuzulassungen pro Jahr	Gibt es (noch) nicht in Serienfertigung
Tankstelle	Herkömmliches Tankstellennetz nutzbar; schnell aufladbar	95 Wasserstofftankstellen (Stand 2022) gibt es bislang in Deutschland; schnell aufladbar	
Motortyp	Verbrennungsmotor	Batterie mit Brennstoffzelle	Verbrennungsmotor
Herstellung	Elektrolyse + Synthese	Elektrolyse + Brennstoffzelle	Elektrolyse
Wirkungsgrad	15 %	34 %	35 % + Wirkungsverlust zu H v. H <sub>2</sub>
Umwelt	In Gesamtbilanz CO <sub>2</sub> -neutral	Keine schädlichen Abgase	
Reichweite	Hoch	Hoch	Hoch
Stromverbrauch pro 100 km (UBA, 2023)	115 kWh	54 kWh	
Preis	4,5 €/l 0,7–1,33 €/l (2050)	22–22 ct/kWh 14–17 ct/kWh (2050)	

Quelle: Wirkungsgrad E-Fuels und Brennstoffzelle (KEMFERT 2021, S. 2); Tankstellen (STATISTA 2023); Preise E-Fuels (RP ONLINE 2023); Preise Brennstoffzelle (UMWELTBUNDESAMT 2023, Frage 9); Verbreitung Brennstoffzelle (UMWELTBUNDESAMT 2023, Frage 4)

## 4.2 Geschätzter Wasserstoffbedarf

Der geschätzte Wasserstoffbedarf im Verkehrssektor variiert nach Drittquellen. Die höhere Bedarfsschätzung in der dena-Studie (DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2018) und des Nationalen Wasserstoffrates (2023) hängt vom unterstellten Technologiemit und der Addition unterschiedlicher Verkehrsträger (Luftfahrt, Schifffahrt, Schwerlastverkehr, Individualverkehr) ab. In Stiftung Klimaneutralität et al. (2021) wird Wasserstoff hauptsächlich im Güterverkehr verwendet.

**Tabelle 9: Geschätzter Wasserstoffbedarf im Verkehrssektor**

Zeitraum	Menge	Quelle
2030	4 TWh	PROGNOS/ÖKO-INSTITUT/WUPPERTAL INSTITUT 2021
2030	18–27 TWh	DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2018, S. 291
2050	40 TWh	PROGNOS/ÖKO-INSTITUT/WUPPERTAL INSTITUT 2021
2050	92–120 TWh	DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2018, S. 129
2050	253 TWh	NATIONALER WASSERSTOFFRAT 2023, S. 11

## 4.3 Fazit

Grüner Wasserstoff im Straßenverkehr wird in der Breite höchstens mit der Brennstoffzelle realisierbar. Für den Individualverkehr gibt es durch die Elektrifizierung eine effizientere Methode der Fortbewegung, weshalb synthetische Kraftstoffe höchstens ein Nischendasein führen werden.

Anders als im Luft- und Schiffsverkehr – hier bestehen gesetzliche Regeln, die die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen verlangen.

Da grüner Wasserstoff für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen notwendig ist, steigt der Bedarf nach Wasserstoff – auch wenn er nicht direkt über Brennstoffzelle oder Wasserstoffmotor genutzt wird – an. Fraglich ist, ob die Produktion von synthetischen Kraftstoffen in inländischen Raffinerien (vgl. Kapitel 2.2) stattfinden oder aus dem Ausland eingekauft wird.

## 5 Tabellarische Zusammenfassungen

Tabelle 10 bietet einen numerischen Überblick über die Energieverbräuche, Wasserstoffbedarfe und CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Branchen und Tabelle 11 gibt eine qualitative Einschätzung möglicher Änderungen der Nachfrage- und Kostenstruktur, Investitionshöhen und Wasserstoffverwendung nach Branchen.

**Tabelle 10: Zusammenfassung und Überblick**

WZ	Bezeichnung	Strategie	Endverbrauch	Anteil VG /	Erdgas in	Anteil VG /	H2 Bedarf in		CO <sub>2</sub>	Anteil VG /
			in TJ*	Verkehr*	TJ*	Verkehr*	TWh	in Tsd. t**		Verkehr**
			2019	2019	2019	2019	Von	Bis	2019	2019
<b>Bergbau, Gewinnung v. Steinen u. Erden, verarbeitendes Gewerbe</b>										
17	Papier	Strom	209 615	8,3	73 406	9,2	2	6	14 575	7
19	Kokerei	H2	N/A-	N/A	N/A	N/A	-	11	31 871	15
20	Chemie	H2	605 634	23,9	221 551	27,8	36	283	26 320	12
231–234	Glas/Keramik	H2	81 928	3,2	62 277	7,8	1,5	13	38 146	18
235–239	Steine und Erden	H2	198 530	7,8	42.920	5,4	-	6		
241	Stahl	H2	648 287	25,6	105 288	13,2	11	91	58 729	28
<b>Verkehr</b>										
	Schiene	Strom	51 925	1,9	0	0	4	253		
	Straße	Strom	2 255 626	81,8	4 755	100				
	Luft	H2	434 818	15,8	0	0				
	Wasser	H2	14 933	0,5	0	0				

Quelle: \* AG ENERGIEBILANZEN 2023; \*\* STATISTISCHES BUNDESAMT 2022b

Tabelle 10 bietet einen numerischen Überblick über die Energieverbräuche, Wasserstoffbedarfe und CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Branchen und Tabelle 11 gibt eine qualitative Einschätzung möglicher Änderungen der Nachfrage- und Kostenstruktur, Investitionshöhen und Wasserstoffverwendung nach Branchen.

**Tabelle 11: Zusammenfassung der Änderungen in der Nachfrage- und Kostenstruktur nach Branchen**

WZ	Bezeichnung	Nachfrage-änderung	Vorleistungs-lieferung	Vorleistungs-nachfrage	Umrüstungs-investitionen für H2	Wasserstoff-verwendung
17	Papier	Unverändert	Unverändert	Deutlich mehr Strom	Gering	Gering
19	Kokerei und Mineralöl-verarbeitung	Starke Veränderung wahrscheinlich: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Weniger durch E-Mobilität</li> <li>• Weniger durch weniger Naphta-Verwendung in der Chemie, wenn diese auf Sekundärroute bei Steamcracker umstellt</li> <li>• Ggf. mehr durch E-Fuel-Produktion</li> </ul>	Unverändert <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ggf. weniger an Chemie</li> <li>• Ggf. weniger an Luftfahrt/ Schifffahrt</li> <li>• Ggf. weniger an Transport-dienstleistungen/ Landverkehr</li> </ul>	Bei H2-Selbstversorgung Einkauf Strom	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei H2-Selbstversorgung Investitionen in Elektrolyseure</li> <li>• Fischer-Tropsch- und Methanol-Anlagen</li> </ul>	Hoch bei unveränderter Nachfrage oder Umstellung auf sythetische Kraft- und Grundstoffe

20	Chemie	Unverändert	Unverändert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weniger Erdgas als Rohstoff für H<sub>2</sub>-Herstellung, stattdessen mehr Strom für Elektrolyse</li> <li>• Noch mehr Strom und H<sub>2</sub> für energetische Substitution von Erdgas</li> <li>• Weniger Naphtha, wenn Umstellung bei Steamcracker auf Sekundärroute</li> <li>• Import von Ammoniak für Weiterproduktion für Düngemittel</li> <li>• Einkauf von Kohlenstoff für Methanolsynthese</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrolyseure statt Dampfreformierer</li> <li>• Umrüstung auf wasserstoffbasierte Steamcracker</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr hoch durch Substitut von grauem durch grünen H<sub>2</sub></li> <li>• Zusätzlich energetische Verwendung von H<sub>2</sub> statt Erdgas, z. B. durch wasserstoffbasierte Steamcracker</li> <li>• Weniger H<sub>2</sub>-Bedarf, wenn Abwanderung von Ammoniakproduktion</li> </ul>
----	--------	-------------	-------------	--	---	---

23.1	Glas	Ggf. weniger aufgrund von Qualitätsänderungen durch Brennung mittels Wasserstoff- statt Erdgas	Ggf. weniger aufgrund von Qualitätsänderungen durch Brennung mittels Wasserstoff- statt Erdgas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höherer Strombedarf</li> <li>• Geringerer Erdgasbedarf</li> <li>• Höherer Wasserstoffbedarf</li> </ul>	Moderat	Gering
23.51	Zement	Unverändert in Abhängigkeit zur Bauindustrie und solange keine Alternativen zu Beton gefunden wurden	Verkauf von aufgefangenen Kohlenstoffen für kohlenstoff-basierte Prozesse bei Raffinerie oder Chemie	Steigender Wasserstoff- und Strombedarf	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei Ersatz von Erdgas durch H2 moderat</li> <li>• Bei Ersatz von alternativen Brennstoffen durch H2 sehr hoch (Ersatz Drehrohrofen) → eher unwahrscheinlich</li> <li>• Wenn mit CCU/CCS-Anlagen, dann sehr teuer</li> </ul>	Gering
24.1	Stahl	Unverändert	Unverändert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Steigender Wasserstoff- und Strombedarf</li> </ul>	Sehr hoch durch Umrüstung auf DRI	Hoch

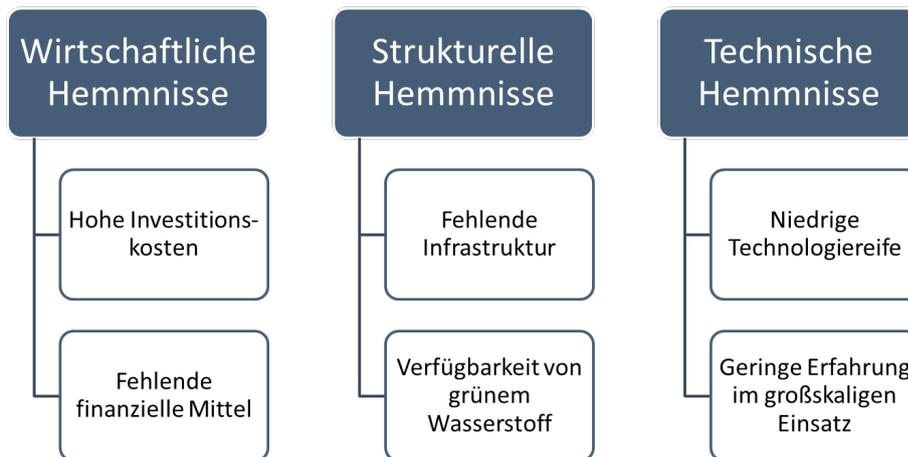
				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sinkender Bedarf an Koks</li> </ul>		
<b>27</b>	Herstellung von Elektronischen Ausrüstungen	Mehr Export	Unverändert	Mehr Edelmetalle wie Iridium, Platin etc.	Unverändert	Keine
<b>28</b>	Maschinenbau	Mehr Export	Unverändert	Mehr Edelmetalle wie Iridium, Platin etc.	Unverändert	Keine
<b>35.1</b>	Stromerzeugung	Zunehmende Nachfrage durch Elektrifizierung	Zunehmende Nachfrage durch Elektrifizierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sinkender fossiler Bedarf an Energieträgern</li> <li>• Steigender Bedarf an Wasserstoff zur Rückverstromung</li> </ul>	Sehr hoch durch neue H2-ready-Gaskraftwerke	Hoch für Umwandlung in Strom
<b>35.2</b>	Gasversorgung	Insgesamt weniger, da zunehmende Elektrifizierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehr Wasserstoff</li> <li>• Weniger Erdgas</li> <li>• Insgesamt aber weniger, da Elektrifizierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sinkender fossiler Bedarf an Erdgas</li> <li>• Steigender Bedarf an Strom zur Wasserstofferzeugung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr hoch durch Investitionen in Elektrolyseure zur Wasserstoff-erzeugung</li> <li>• Bau von neuen Pipelines</li> </ul>	Hoch für Weiterleitung

## 6 Fazit und Ausblick

Die Analyse hat gezeigt, dass für einige Industrien, wie bspw. die Chemieindustrie, die Umstellung auf eine grüne Wasserstoffwirtschaft mit weniger Aufwand verbunden ist als für andere (z. B. Stahlindustrie oder Energiewirtschaft). Für manche Industrien ist keine Änderung in der Nachfragestruktur zu erwarten (z. B. Chemieindustrie), für andere Industrien brechen wichtige Geschäftsfelder weg (z. B. Raffinerien). Andere können auch durch neue Geschäftsfelder profitieren (z. B. Zementindustrie). Auch die Kostenstruktur ist je nach Branche unterschiedlich stark betroffen. So fällt für einige Industrien (Energieversorger) der Einkauf von wichtigen Rohmaterialien komplett weg und für die meisten kommt Wasserstoff oder grüner Strom als neuer Kostenblock hinzu. Für alle betrachteten Industrien nimmt der Stromeinsatz anteilig zu.

Somit hängt das Gelingen der Transformation von verschiedenen Faktoren ab, wie beispielsweise von wirtschaftlichen Faktoren: Werden die hohen Investitionen getätigt? Gibt es ausreichend finanzielle Mittel, die dafür notwendigen Aufwendungen zu tätigen? Gegebenenfalls gehören dazu auch Förderinstrumente vonseiten der Politik, welche die Unternehmen bei der Transformation unterstützen. Aber auch strukturelle Faktoren sind entscheidend und diese liegen nicht allein in unternehmerischer Hand. Dabei geht es vor allem um den Ausbau der Infrastruktur – sei es der Ausbau der erneuerbaren Energien oder der Aus- und Umbau des Transportnetzes, damit Wasserstoff auch an die Endnutzer geliefert werden kann. Alles entscheidend ist die Frage, ob es überhaupt genügend grünen Wasserstoff geben wird, um die gesamte Endnachfrage zu erfüllen. Hierfür ist nicht nur der Ausbau der inländischen Erzeugungskapazitäten entscheidend, sondern auch der Import von grünem Wasserstoff aus dem Ausland. Darüber hinaus gibt es technische Faktoren, die es zu berücksichtigen gilt. Viele der Technologien – sei es die Elektrolyse, die CO<sub>2</sub>-Abscheidung oder die Elektrifizierung von bestimmten Produktionsprozessen – sind heute noch im Forschungsstadium oder werden nur in einzelnen Pilotprojekten erprobt. Für eine Transformation müssen diese Technologien die Pilotphase verlassen und im industriellen Maßstab erzeugt werden. Dies bedeutet auch, dass die bislang in Einzelproduktion/Manufakturbetrieb hergestellten Anlagen (z. B. Elektrolyseure) in die Serienproduktion übergehen. Die Skalierung der Technologien kann eine Herausforderung sein. Es wird deutlich, dass der Erfolg der Transformation von der Gleichzeitigkeit der Prozesse und von ihrer Stellung in der Wertschöpfungskette abhängt. So kann die CO<sub>2</sub>-Abspaltung bspw. in der Zementindustrie bei der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen in Raffinerien Anwendung finden. Die Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus Prozessen ist einfacher und günstiger als die Abscheidung aus der Luft (DEUTSCHER BUNDESTAG 2020, 5 ff.). Angelehnt an Schimmel & Sach (2022) fasst Abbildung 40 die Hemmnisse zusammen.

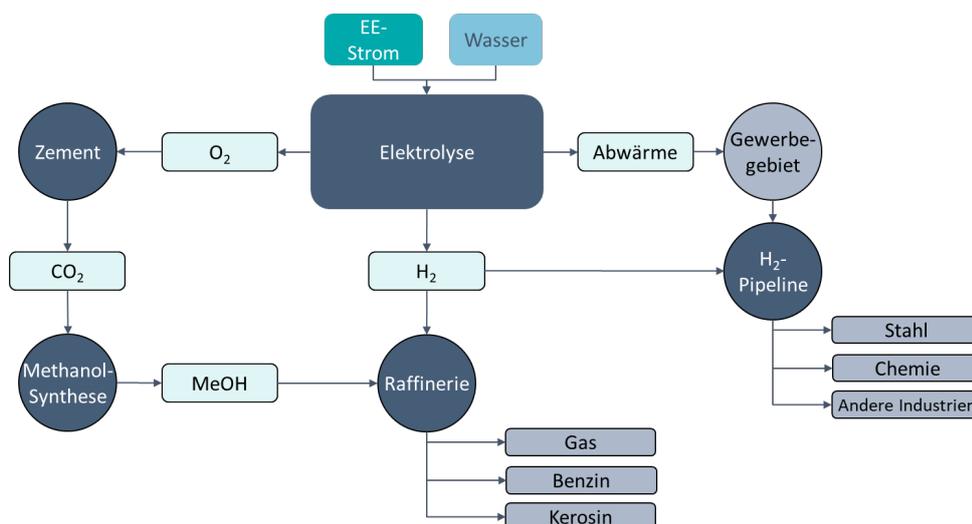
**Abbildung 40: Hemmnisse für eine erfolgreiche Transformation**



Quelle: SCHIMMEL/SACH 2022, S. 41

Können diese Hemmnisse allerdings überwunden werden, ist es möglich, in eine wasserstoffbasierte Wirtschaft überzugehen. Abbildung 41 zeigt das Schema der Funktionsweise einer wasserstoffbasierten Wirtschaft und wie sie zusammenwirken könnte. Im Zentrum steht dabei die Elektrolyse auf Basis von erneuerbaren Energien. Der so hergestellte Wasserstoff gelangt zunächst über ein Pipelinenetz zu seinen Anwenderindustrien wie die Chemie- oder Stahlindustrie. Dort wird Wasserstoff als Brennstoff oder als Rohstoff genutzt und kann somit zu merklicher CO<sub>2</sub>-Reduktion beitragen.

**Abbildung 41: Mögliches Schemata einer wasserstoffbasierten Wirtschaft**



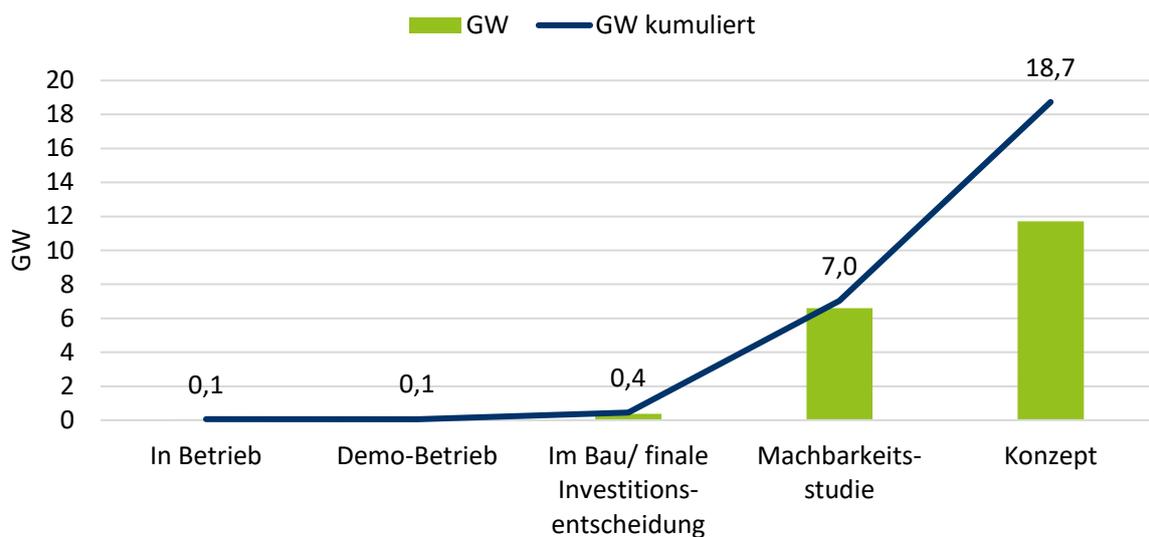
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an ENTWICKLUNGSAGENTUR REGION HEIDE 2023

Einige Produktionsprozesse können nur durch CO<sub>2</sub>-Abschneidung vollständig klimaneutral werden. Dies ist beispielsweise bei der Zementindustrie so. Wenn das CO<sub>2</sub> abgefangen werden würde, könnte

es in der Methanol-Synthese zusammen mit Wasserstoff in Raffinerien zur Produktion von synthetischen Treibstoffen genutzt werden.

Wie erfolgreich die Transformation in eine Wasserstoffwirtschaft gelingt, bleibt abzuwarten. Noch ist die Zeit zu früh und die bislang gegangenen Schritte zu klein, um den Fortschritt bewerten zu können. Gemäß der International Energy Agency (IEA 2024) sind in Deutschland Elektrolyseure mit 0,06 GW bislang in Betrieb (vgl. Abbildung 42). Inklusive der Anlagen im Demo-Betrieb und inklusive der in Bau befindlichen Anlagen bzw. Anlagen mit ausstehenden Investitionsentscheidungen sind in den nächsten Jahren als sicher zu geltende zusätzliche Kapazitäten in Höhe von 0,4 GW zu erwarten. Damit würden aber auch lediglich 4,4 Prozent des Kapazitätsziels des Jahres 2030 erreicht werden. Es ist daher notwendig, dass mindestens die Projekte im Status von Machbarkeitsstudien realisiert werden, sodass wenigstens 70 Prozent des Ausbauzieles erreicht werden. Sollten zusätzlich auch die Konzeptprojekte realisiert werden, die bis ins Jahr 2035 reichen, könnte das 10-GW-Ziel deutlich übertroffen werden.

**Abbildung 42: H<sub>2</sub>-Produktionsprojekte in Deutschland nach Projektstatus**



Quelle: IEA 2024

## 7 Literaturverzeichnis

AG ENERGIEBILANZEN (Hrsg.): Bilanzen 1990 bis 2030. Energiebilanz 2019. Berlin 2023. URL: [https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2011-2020&wpv\\_aux\\_current\\_post\\_id=45&wpv\\_aux\\_parent\\_post\\_id=45&wpv\\_view\\_count=2753-CATRe4257049c177cf191052746afc46d0a3](https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2011-2020&wpv_aux_current_post_id=45&wpv_aux_parent_post_id=45&wpv_view_count=2753-CATRe4257049c177cf191052746afc46d0a3) (Stand: 10.04.2024)

AGORA ENERGIEWENDE (Hrsg.); WUPPERTAL INSTITUT (Hrsg.): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin 2020. URL: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung\\_Industrie/164\\_A-EW\\_Klimaneutrale-Industrie\\_Studie\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf) (Stand: 19.11.2021)

AGORA INDUSTRIE (Hrsg.); FUTURECAMP (Hrsg.); WUPPERTAL INSTITUT (Hrsg.); ECOLOGIC INSTITUT (Hrsg.): Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Kurzfristige Schritte auf dem Pfad zur Klimaneutralität der deutschen Grundstoffindustrie. 2021. URL: [https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_10\\_DE\\_KIT/A-EW\\_249\\_Klimaschutzvertraege-Industrietransformation-Studie\\_WEB.pdf](https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_10_DE_KIT/A-EW_249_Klimaschutzvertraege-Industrietransformation-Studie_WEB.pdf) (Stand: 10.04.2024)

BASF (Hrsg.): Geschäfts- und Wettbewerbsumfeld. BASF-Bericht 2023. Ludwigshafen 2023a. URL: <https://bericht.basf.com/2023/de/zusammengefasster-lagebericht/die-basf-gruppe/geschaeftsumfeld.html> (Stand: 10.04.2024)

BASF (Hrsg.): Neue Technologien. Ludwigshafen 2023b. URL: <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-produce-safely-and-efficiently/energy-and-climate-protection/carbon-management/innovations-for-a-climate-friendly-chemical-production.html> (Stand: 10.04.2024)

BMWK (Hrsg.): Bundesminister Habeck will den Einsatz von CCS ermöglichen: „Ohne CCS können wir unmöglich die Klimaziele erreichen.“. BMWK legt Eckpunkte einer Carbon Management Strategie und den Entwurf zur Änderung des Kohlendioxidspeicherungsgesetzes vor. Berlin 2024a. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/02/20240226-habeck-will-den-einsatz-von-ccs-ermoeglichen.html>

BMWK (Hrsg.): Unser Strommarkt für die Energiewende. Berlin 2024b. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/strommarkt-der-zukunft.html> (Stand: 10.04.2024)

BMWK (Hrsg.): Effiziente Nutzung von Wasserstoff in der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie. Ergebnispapier zum NWS-Industriedialog. Berlin 2022a. URL: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/20220913-effiziente-nutzung-von-wasserstoff-in-der-glas-keramik-papier-und-ne-metallindustrie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/20220913-effiziente-nutzung-von-wasserstoff-in-der-glas-keramik-papier-und-ne-metallindustrie.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (Stand: 10.04.2024)

BMWK (Hrsg.): Fortschrittsbericht zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie. Berlin 2022b. URL: [https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2022/fortschrittsbericht-wasserstoffstrategie-nws.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2022/fortschrittsbericht-wasserstoffstrategie-nws.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (Stand: 06.12.2022)

BUNDESNETZAGENTUR (Hrsg.): Aktuelle Lage der Gasversorgung in Deutschland. Bonn 2024. URL: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Gasversorgung/aktuelle\\_gasversorgung/start.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Gasversorgung/aktuelle_gasversorgung/start.html) (Stand: 10.04.2024)

BUNDESNETZAGENTUR (Hrsg.): Kraftwerksliste. Bonn 2022. URL: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html> (Stand: 10.04.2024)

BUNDESREGIERUNG (Hrsg.): Für eine klimafreundliche und sichere Energieversorgung. Kraftwerksstrategie für wasserstofffähige Kraftwerke. Berlin 2024. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/kraftwerksstrategie-2257868>

BUNDESVERBAND SEKUNDÄRROHSTOFFE UND ENTSORGUNG (Hrsg.): Nutzung von Wasserstoff in der Glasindustrie vielversprechend. Bonn 2022. URL: <https://www.bvse.de/recycling-glas/nachrichten-glasrecycling/8520-nutzung-von-wasserstoff-in-der-glasindustrie-vielversprechend.html>

BUNDESVERBAND WINDENERGIE (Hrsg.): Status des Offshore-Windenergieausbaus. Verschiedene Jahrgänge. Berlin 2024a. URL: <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/> (Stand: 16.01.2024)

BUNDESVERBAND WINDENERGIE (Hrsg.): Status des Windenergieausbaus an Land. Verschiedene Jahrgänge. Berlin 2024b. URL: <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/> (Stand: 16.01.2024)

BV GLAS (Hrsg.): 2021/22 Jahresbericht. Düsseldorf 2022. URL: [https://www.bvglas.de/media/Jahresbericht/Jahresbericht\\_2021.pdf](https://www.bvglas.de/media/Jahresbericht/Jahresbericht_2021.pdf) (Stand: 10.04.2024)

DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN E.V. (Hrsg.): Wasserstoff-Kompass. München 2024. URL: <https://www.wasserstoff-kompass.de/> (Stand: 02.05.2024)

DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR (Hrsg.): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin 2018. URL: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_lang.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf) (Stand: 19.11.2021)

DEUTSCHER BUNDESTAG (Hrsg.): Einzelfragen zu synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels): Herstellungskosten und Anrechnung auf den CO<sub>2</sub>-lottenverbrauch. Berlin 2020. URL: <https://www.bundestag.de/resource/blob/818128/29f9702acd2ddfad53b9816470949cb/WD-8-079-20-pdf-data.pdf> (Stand: 10.04.2024)

DIERMANN, Ralph 2022: Klimaneutraler Wasserstoff: Warum die Umrüstung von Gaskraftwerken schwierig wird. In: DER SPIEGEL, Ausgabe vom 04.05.2022. URL: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/wasserstoff-warum-die-umruistung-von-gaskraftwerken-schwierig-wird-a-a0ca942b-ba6c-4074-93be-842cc6ece956>. (Stand: 10.04.2024)

ENERGIEWIRTSCHAFTLICHES INSTITUT AN DER UNIVERSITÄT ZU KÖLN (Hrsg.): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Köln 2021. URL: [https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2022/03/211005\\_EWI-Gutachterbericht\\_dena-Leitstudie-Aufbruch-Klimaneutralitaet.pdf](https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2022/03/211005_EWI-Gutachterbericht_dena-Leitstudie-Aufbruch-Klimaneutralitaet.pdf) (Stand: 10.04.2024)

ENTWICKLUNGSAGENTUR REGION HEIDE (Hrsg.): Grüner Wasserstoff und Dekarbonisierung im industriellen Maßstab. Heide 2023. URL: <https://www.region-heide.de/projekte/westkueste100.html> (Stand: 10.04.2024)

FISCHER, Konrad 2022: Energiewende: Eine Karte zeigt, wo in den nächsten Monaten neue Solarparks dazukommen. In: Wirtschaftswoche, Ausgabe vom 06.12.2022. URL: <https://www.wiwo.de/technologie/umwelt/tracking-der-energiewende-29-hektarweise-energie-hier-sollen-grosse-solarparks-entstehen/28840040.html> (Stand: 10.04.2024)

FRANCKE, Vorlkhard: Das Herz des Chemieparks wird elektrisch. Heidelberg 2021. URL: <https://www.svp.de/steamcracker-das-herz-des-chemieparks-wird-elektrisch/> (Stand: 10.04.2024)

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI (Hrsg.): Industrie Vertiefung: Strom, H<sub>2</sub>, PtG T45. Karlsruhe 2022. URL: <https://enertile-explorer.isi.fraunhofer.de/open-view/52591/bd358cb8cad9b35dcb164087d19b55c3> (Stand: 10.04.2024)

GERES, Roland; KOHN, Andreas; LENZ, Sebastian C.; AUSFELDER, Florian; BAZZANELLA, Alexis; MÖLLER, Alexander: Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland: eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. Frankfurt am Main 2019. URL: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>

HANS-BÖCKLER-STIFTUNG (Hrsg.): Transformationspfade in der Stahlindustrie und ihrer personalpolitischen Herausforderungen. Hattingen 2023. URL: [https://www.boeckler.de/data/downloads/OEA/Veranstaltungen/2023/v\\_2023\\_06\\_06\\_kuester-simic.pdf.pdf](https://www.boeckler.de/data/downloads/OEA/Veranstaltungen/2023/v_2023_06_06_kuester-simic.pdf.pdf)

HARTBRICH, Iestyn 2022: Stahl: Diese Anlagentechnik wird bei Thyssenkrupp und Co. den Hochofen ablösen. Wasserstoff statt Kohle. In: VDI Nachrichten, Ausgabe vom 08.08.2022. URL: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/werkstoffe/direktreduktion-diese-anlagentechnik-wird-bei-thyssenkrupp-und-co-den-hochofen-abloesen/> (Stand: 10.04.2024)

IEA (Hrsg.): Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database. Corrected Version. Paris 2024. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database> (Stand: 10.04.2024)

ISLAMI, B.; GIESE, A.; BIEBL, M.; FLEISCHMANN, B.; OVERATH, J.; NELLES, C.: Wasserstoffnutzung in der Glasindustrie als Möglichkeit zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Einsatzes erneuerbarer Gase. – Untersuchung der Auswirkungen auf den Glasherstellungsprozess und Analyse der Potenziale in NRW (Akronym: HyGlass). Essen, Düsseldorf 2022. URL: <https://www.bvglas.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2514&token=69553e2ada72ffc160a9ebce8174bfcedf2870ec> (Stand: 10.04.2024)

KEMFERT, C.: Schriftliche Stellungnahme zur Anhörung des Ausschusses für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen des Hessischen Landtages zum Gesetzentwurf: Hessisches Wasserstoffzukunftsgesetz. Berlin 2021. URL: [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04\\_Stellungnahmen/2021\\_09\\_stellungnahme\\_landtag.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2021_09_stellungnahme_landtag.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (Stand: 10.04.2024)

KOERTH, K.; HAITSCH, A. 2023: Klimaschutz in der Seefahrt: EU beschließt E-Fuel-Quote – für Schiffe. In: DER SPIEGEL, Ausgabe vom 23.03.2023. URL: <https://www.spiegel.de/auto/eu-beschliesst-e-fuels-fuer-schiffe-emissionen-sollen-bis-2050-um-80-prozent-sinken-a-164b2ad8-ff20-4d65-81ba-a1b2336ed343> (Stand: 10.04.2024)

K-ZEITUNG (Hrsg.) 2022: Erster elektrischer Steamcracker im Großformat, Ausgabe vom 06.09.2022. URL: <https://www.k-zeitung.de/erster-elektrischer-steamcracker-im-grossformat> (Stand: 10.04.2024)

NATIONALER WASSERSTOFFRAT (Hrsg.): Grundlagenpapier: Treibhausgaseinsparungen und der damit verbundene H<sub>2</sub>-Bedarf in Deutschland. Grundlagenpapier. Berlin 2023. URL: [https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2023/2023-02-01\\_NWR\\_Grundlagenpapier\\_H2-Bedarf\\_2.pdf](https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2023/2023-02-01_NWR_Grundlagenpapier_H2-Bedarf_2.pdf) (Stand: 10.04.2024)

NATIONALER WASSERSTOFFRAT (Hrsg.): Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021-2025. Berlin 2021. URL: [https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/NWR\\_Aktionsplan\\_Wasserstoff\\_2021-2025\\_WEB-Bf.pdf](https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/NWR_Aktionsplan_Wasserstoff_2021-2025_WEB-Bf.pdf) (Stand: 22.12.2021)

NEUWIRTH, M.; FLEITER, T.: Hydrogen technologies for a CO<sub>2</sub>-neutral chemical industry – a plant-specific bottomup assessment of pathways to decarbonise the German chemical industry. Karlsruhe 2020. URL: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/6e35fa31-09a5-462a-87d7-51bb242f8af5/content> (Stand: 11.04.2024)

NEUWIRTH, Marius; FLEITER, Tobias; MANZ, Pia; HOFMANN, René: The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany. In: Energy Conversion and Management 252 (2022)

NONNAST, Thomas: BASF, SABIC und Linde beginnen mit dem Bau der weltweit ersten Demonstrationsanlage für großtechnische elektrisch beheizte Steamcracker-Öfen. Ludwigshafen 2022. URL: <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2022/09/p-22-326.html>

OLK, Julian; WERMKE, Isabelle 2024: Sieben Milliarden Euro für grünen Stahl – und das ist erst der Anfang. In: Handelsblatt, Ausgabe vom 25.01.2024. URL: <https://www.handelsblatt.com/politik/deutschland/dekarbonisierung-sieben-milliarden-euro-fuer-gruenen-stahl-und-das-ist-erst-der-anfang/100009407.html> (Stand: 02.05.2024)

PROGNOS (Hrsg.); ÖKO-INSTITUT (Hrsg.); WUPPERTAL INSTITUT (Hrsg.): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Berlin 2021. URL: [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021\\_04\\_KNDE45/A-EW\\_209\\_KNDE2045\\_Zusammenfassung\\_DE\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf) (Stand: 11.04.2024)

RP ONLINE (Hrsg.) 2023: Was Sie über E-Fuels wissen müssen, Ausgabe vom 05.05.2023. URL: [https://rp-online.de/leben/ratgeber/verbraucher/e-fuels-preis-kaufen-vorteile-nachteile-alle-infos\\_aid-89771357](https://rp-online.de/leben/ratgeber/verbraucher/e-fuels-preis-kaufen-vorteile-nachteile-alle-infos_aid-89771357) (Stand: 02.05.2024)

SCHEUERMANN, Armin 2021: Elektro-Steamcracker sollen die Chemie nachhaltiger machen. In: CHEMIE TECHNIK, Ausgabe vom 20.07.2021. URL: <https://www.chemietechnik.de/anlagenbau/elektro-steamcracker-sollen-die-chemie-nachhaltiger-machen-109.html> (Stand: 11.04.2024)

SCHIMMEL, M.; SACH, T.: Energiewende in der Industrie - Abschlussveranstaltung. Online 2022. URL: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-abschlussveranstaltung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-abschlussveranstaltung.pdf?__blob=publicationFile&v=1)

SCHLICHTMANN, E.; BUWIDOWITSCH, E.; THOMAS, A.; LEYDOLPH, R.; STRAßBURG, S.; ROMANO, M.-S.: Wasserstoffpotentiale bis zum Jahr 2050 in Deutschland und der Europäischen Union. Erfurt 2022. URL: [https://www.fh-erfurt.de/fileadmin/Dokumente/GTI/Dokumente\\_GE/forschung/lenz/fp-2022-wasserstoffnachfragepotentiale.pdf](https://www.fh-erfurt.de/fileadmin/Dokumente/GTI/Dokumente_GE/forschung/lenz/fp-2022-wasserstoffnachfragepotentiale.pdf) (Stand: 11.04.2024)

SFC ENERGY (Hrsg.): Glossar Dampfreformierung. Brunthal-Nord 2023. URL: <https://www.sfc.com/glossar/dampfreformierung/> (Stand: 11.04.2024)

STATISTA (Hrsg.): Anzahl der Wasserstofftankstellen in Deutschland von 2018 bis 2023. Hamburg 2023. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820836/umfrage/anzahl-der-wasserstofftankstellen-in-deutschland/> (Stand: 02.05.2024)

STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): 2,6 Millionen Photovoltaikanlagen in Deutschland installiert. Wiesbaden 2023a. URL: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2023/PD23\\_25\\_p002.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2023/PD23_25_p002.html)

STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): 85111-0005: Umweltökonomische Gesamtrechnung. Wiesbaden 2023b.

STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): Input-Output-Rechnung 2019. Wiesbaden 2022a.

STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Anthropogene Luftemissionen. Berichtszeitraum 2000-2020. Wiesbaden 2022b.

STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterungen. Wiesbaden 2008

STIFTUNG ARBEIT UND UMWELT DER IG BCE (Hrsg.): Wasserstoffbasierte Industrie in Deutschland und Europa: Potenziale und Rahmenbedingungen für den Wasserstoffbedarf und -ausbau sowie die Preisentwicklungen für die Industrie. Berlin 2021. URL: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/53ad9f22-en.pdf?expires=1668505351&id=id&accname=guest&checksum=28D76EE3D0D3082A4CCAF5A37C314EBA> (Stand: 05.07.2022)

UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): Wasserstoff im Verkehr: Häufig gestellte Fragen (FAQs). Dessau-Roßlau 2023. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/kraftstoffe-antriebe/wasserstoff-im-verkehr-haeufig-gestellte-fragen#einleitung> (Stand: 11.04.2024)

VERBAND DER CHEMISCHEN INDUSTRIE (Hrsg.): Chemistry 4 Climate. Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Abschlussbericht 2023. Frankfurt am Main 2023. URL: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf> (Stand: 11.04.2024)

VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE (Hrsg.): Zementindustrie im Überblick 2023/2024. Düsseldorf 2023. URL: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2023-2024> (Stand: 11.04.2024)

VON GERSDORFF, Alexander 2018: VISION 2050 der europäische Mineralölwirtschaft: Benzin und Diesel mit Klimaschutz. In: Presseportal.de, Ausgabe vom 19.04.2018. URL: <https://www.presseportal.de/pm/67785/3920874> (Stand: 11.04.2024)

WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL (Hrsg.): Nationale Wasserstoffstrategie 2.0: Handlungsbedarf aus Sicht der Stahlindustrie. Berlin 2022. URL: [https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/221125\\_NWS-2.0-Handlungsbedarf-aus-Sicht-der-Stahlindustrie.pdf](https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/221125_NWS-2.0-Handlungsbedarf-aus-Sicht-der-Stahlindustrie.pdf) (Stand: 02.05.2024)

WWF DEUTSCHLAND (Hrsg.): Pathways to Paris: Stahlproduktion. Orientierungsrahmen für Unternehmensdialoge. Berlin 2022. URL: [https://pathwaystoparis.com/wp-content/uploads/2022/11/PtP\\_OR\\_Stahl.pdf](https://pathwaystoparis.com/wp-content/uploads/2022/11/PtP_OR_Stahl.pdf) (Stand: 11.04.2024)

ZENK, Johanna; RONSIEK, Linus; SCHUR, Alexander C.; HUPP, Jonas; SCHNEEMANN, Christian; MÖNNIG, Anke; SCHROER, Jan P.: Exportpotenziale von Wasserstofftechnologien. In: BIBB Discussion Paper (2023)